

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электропривод и автоматика

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Регулируемый электропривод переменного тока вентилятора котла</b>

УДК 62-83-52:621.184.85

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Ястребов Роман Олегович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусев Н.В.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук И.В.	к.т.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И. о. зав. кафедрой- руководителя ОЭЭ ИШЭ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

## Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения
<b>Р 1</b>	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем</i> .
<b>Р 2</b>	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
<b>Р 3</b>	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты</i> .
<b>Р 4</b>	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
<b>Р 5</b>	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
<b>Р 6</b>	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
<b>Р 7</b>	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
<b>Р 8</b>	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
<b>Р 9</b>	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
<b>Р 10</b>	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
<b>Р 11</b>	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
<b>Р 12</b>	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электропривод и автоматика

УТВЕРЖДАЮ:

И. о. зав. кафедрой- руководителя  
ОЭЭ ИШЭ

\_\_\_\_\_ А.С. Ивашутенко  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

**Бакалаврской работы**

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
З-5Г5А1	Ястребову Роману Олеговичу

Тема работы:

<b>Регулируемый электропривод переменного тока вентилятора котла</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№58-27/с от 27.02.2020г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	29.05.2020г.
--	--------------

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документация.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	введение; описание технологического процесса; обоснование и выбор системы электропривода; выбор элементов и расчет параметров силового канала регулируемого электропривода; расчет статических и динамических характеристик; безопасность и экологичность проекта; экономическая часть; заключение.

Перечень графического материала		Функциональная схема Схема электрическая структурная. Имитационная модель электропривода Динамические характеристики электропривода Статические характеристики электродвигателя и электропривода Технико-экономические показатели.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы		
Раздел	Консультант	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук Ирина Вадимовна	
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна	
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:		
Заключение		

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	20.03.2020г.
---	--------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусев Н.В.	к.т.н.		20.03.2020г..

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Ястребов Роман Олегович		20.03.2020г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электропривод и автоматика

Период выполнения весенний семестр 2019 /2020 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа
---------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	29.05.2020г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.05.2020	Основная часть	60
15.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
18.05.2020	Социальная ответственность	20

#### СОСТАВИЛ:

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусев Н.В.	К.Т.Н.		

#### СОГЛАСОВАНО:

**И. о. зав. кафедрой- руководителя ОЭЭ ИШЭ**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	К.Т.Н.		

## **РЕФЕРАТ**

**ДУТЬЕВОЙ ВЕНТИЛЯТОР, АСИНХРОННЫЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ.**

Объектом выпускной квалификационной работы является электропривод дутьевого вентилятора.

Цель работы – разработка и исследование асинхронного частотно-регулируемого электропривода дутьевого вентилятора.

В выпускной квалификационной работе был произведён расчет и выбор приводного двигателя; преобразователя частоты, а также определены параметры силовой цепи. Обоснован выбор способа управления, рассчитаны механические и электромеханические характеристики. Методом имитационного моделирования на ЭВМ исследованы переходные процессы в основных режимах работы.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010; для расчетов и построений рисунков использовались программы: MathCAD 14, Microsoft Visio, Microsoft Power Point 2010; имитационное моделирование выполнено с помощью пакета программ Simulink (MatLab 7.11).

## Содержание

### Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1.ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОТЕЛЬНОЙ .....	11
1.1. Управление исполнительными механизмами котла .....	18
1.2. Управление котлом в различных теплотехнических состояниях .....	21
1.3. Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода для вентилятора.....	30
2.ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ .....	33
2.1. Аэродинамические характеристики и параметры вентилятора ВДН-12,5У .....	33
2.2. Механические характеристики вентилятора.....	36
2.3. Выбор приводного двигателя.....	38
2.4. Расчёт естественных характеристик электродвигателя .....	45
2.5. Выбор типа преобразователя и способа регулирования .....	49
2.6. Структурная схема силового канала контура системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель.....	50
2.7. Расчёт характеристик разомкнутой системы ПЧ-АД и оценка выполнения заданной области работы электропривода .....	52
2.8.Расчет статических характеристик разомкнутой системы отдельном преобразователь частоты -асинхронный двигатель при частотном управлении .....	59
3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА САР ЭП И НАСТРОЙКА КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ .....	65
3.1. Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно- регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением ....	65
3.2 Структурная схема нелинейной САУ регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением.....	67

3.3 Оптимизация координат контуров мощность регулирования времени САУ принят электропривода малая с учетом дымовых квантования координат сигналов.....	69
3.3.1. Оптимизация контура тока с ПИ-регулятором, аналоговым датчиком тока и учетом квантования сигналов в контуре.....	70
3.3.2. Оптимизация контура скорости поскольку с ПИ-регулятором параметры и без вращения датчика приведена скорости.....	76
3.3.3. Оптимизация контура потокосцепления ротора с ПИ-регулятором значений без времени датчика потока .....	82
4. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА И ЕЁ ИССЛЕДОВАНИЕ .....	85
4.1. Имитационные исследования нелинейной САУ регулируемого электропривода.....	85
4.2. Имитационные исследования работы САУ электропривода в составе технологической установки .....	110
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ» .....	119
5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	120
5.1 Анализ конкурентных технических решений .....	121
5.2 SWOT анализ .....	123
5.3 Планирование ИП .....	127
5.3.1 Определение трудоемкости выполнения работ .....	128
5.3.2 Разработка графика реализации ИП.....	129
5.3.3 Бюджет исследовательской работы .....	135
5.3.4 Материальные затраты ИП .....	135
5.3.5 Специальное оборудование.....	136
5.3.6 Расчет амортизации специального оборудования .....	137
5.3.7 Основная заработная плата .....	138
5.3.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	140



5.3.9 Накладные расходы.....	140
5.4 Определение ресурсоэффективности исследования .....	141
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ» .....	146
6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	147
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	147
6.1.1 Требования, предъявляемые к персоналу.....	147
6.1.2 Требования, предъявляемые к рабочему месту .....	148
6.1.2 Трудовой распорядок и оплата труда .....	148
6.2.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов.....	149
6.2.2 Опасные производственные факторы:.....	150
6.2.3 Вредные производственные факторы .....	150
6.2.4 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных производственных факторов. ....	154
6.3 Экологическая безопасность.....	155
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	159
Список литературы. ....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	166

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не один промышленный технологический процесс невозможно представить, в которых не используются электрические двигатели. Частотные преобразователи, в технологических процессах решают задачи автоматизации управления электрическими двигателями, и являются неотъемлемым звеном современного электропривода.

По отношению к другим типам приводов, частотный электропривод имеет ряд значительных преимуществ:

- плавный пуск и торможение электропривода;
- широкий диапазон регулирования скорости вращения электродвигателя;
- высокая точность поддержания скорости вращения электродвигателя на установившихся режимах;
- режимы энергосбережения;
- и др.

На любом предприятии и в любых технологических условиях существуют как каждодневные задачи, так и задачи специфические, связанные с особенностью технологического процесса и технологического оборудования, решение которых не всегда является простой задачей.

Из всех механизмов котельной, приводимых в движение асинхронными двигателями, определяющее значение с точки зрения энергетической эффективности имеют тягодутьевые механизмы. Они потребляют почти 60% электроэнергии от собственных нужд котельной.

Использование частотного регулирования электроприводов тягодутьевых механизмов обеспечивает:

- автоматическое поддержание на заданном уровне разрежения на выходе котла и давления подаваемого в котел воздуха во всех режимах работы (розжиг/останов котла, работа при различном количестве включенных горелок);

- сокращение времени розжига по сравнению с ручным управлением;  
устойчивый автоматический розжиг котла без отрыва пламени.

При использовании в электроприводе вентилтора котла средств автоматизации помимо экономии электроэнергии обеспечивается стабильный режим работы котельной; минимальный выброс вредных веществ в атмосферу, увеличение срока эксплуатации оборудования.

## **1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОТЕЛЬНОЙ**

Система управления реализована на базе программируемых логических контроллеров КР-500, размещенных в шкафу управления котлом со встроенной операторской панелью Weintek и SCADA-системы Trace Mode на АРМ оператора.

Система управления включает следующие средства:

- станция управления с операторской панелью (рисунок 1.1);
- операторская станция;
- шкаф электрический для управления регулирующей арматурой;
- шкаф электрический для управления запорной арматурой;
- аппаратура частотного регулирования скоростью двигателей тягодутьевых машин;
- комплект приборов КИП и А.

Электропитание станции управления осуществляется напряжением 220 В, потребляемая мощность до 3,0 кВт.

Заземление станции управления и шкафов электрических осуществляется в соответствии с общими требованиями ПУЭ для потребителей до 1000 В. Отдельного контура заземления для средств автоматики котла не требуется.

Станция управления (контроллер с модулями УСО) имеет климатическое исполнение УХЛ 3.1 при температуре окружающего воздуха от 0 до +40°C.

Конструктив станции имеет габаритные размеры 1800х600х600 двухстороннего обслуживания, исполнение IP54 по защите от внешних воздействий, что обеспечивает устойчивую работу аппаратуры в производственных помещениях. Поэтому станция управления и шкафы электрические могут размещаться в непосредственной близости от котла.

В состав операторской станции входят два компьютера офисного исполнения, поэтому она должна размещаться в отдельном помещении с комфортными условиями окружающей среды: температура от 15 до 25°C, относительная влажность 40... 70%.

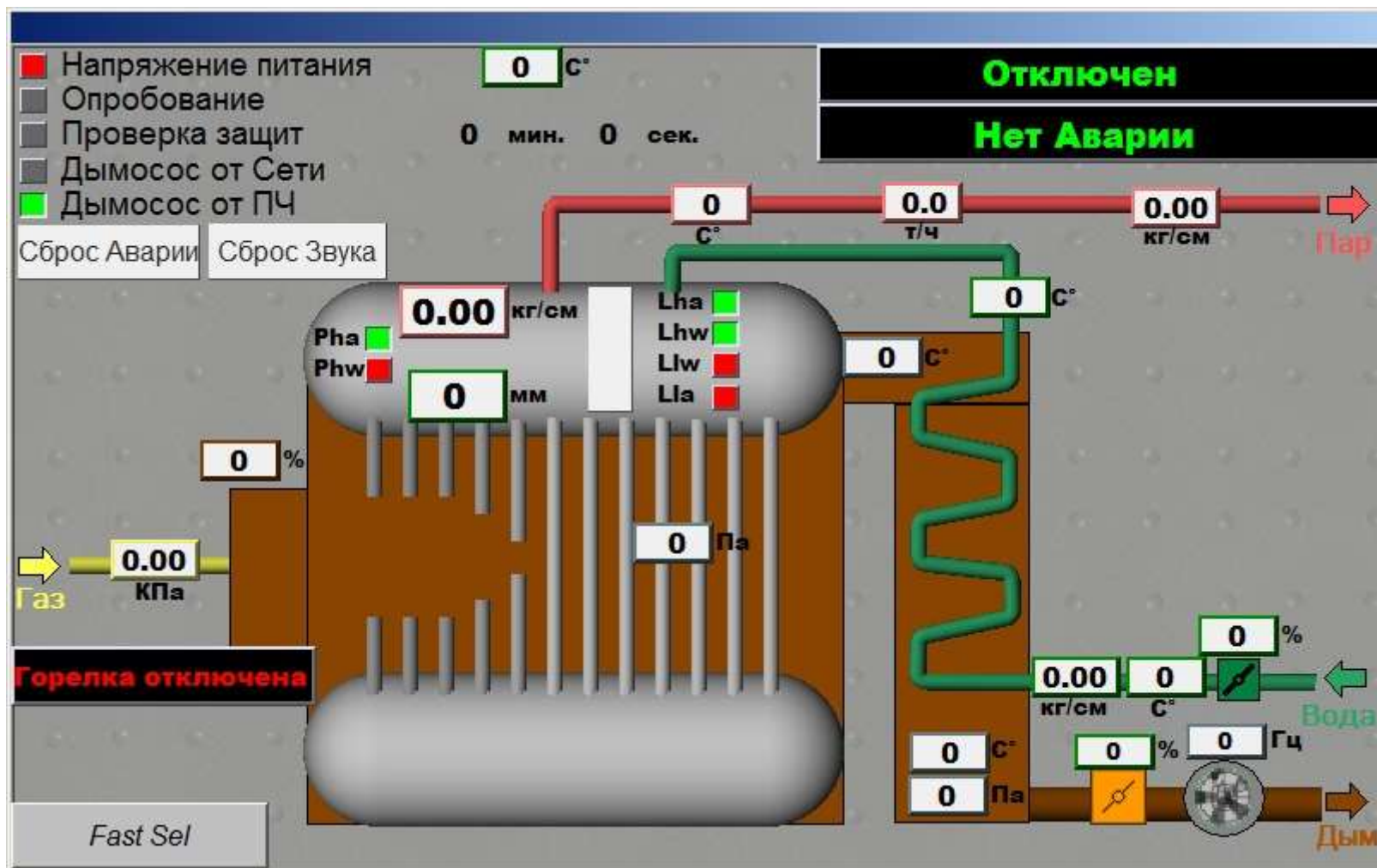


Рисунок 1.1 – Мнемосхема системы автоматического управления технологическим процессом

Контроль состояния технологического оборудования и отдельных исполнительных механизмов осуществляется с помощью показывающих приборов, датчиков технологических параметров и состояния исполнительных механизмов котла. Сигналы от датчиков вводятся в устройство управления для анализа и выработки управляющих воздействий в соответствии с алгоритмом управления. Одновременно эти сигналы используются для отображения информации об объекте, регистрации и сигнализации средствами системы управления (местный пульт станции управления, дисплей операторской станции). Комплект приборной продукции обеспечивает контроль параметров, характеризующих работу котла, обеспечивающих автоматическое управление котлом и полное представление информации оперативному персоналу о режимах работы и состоянии оборудования котла.

Устройство управления формирует сигналы управления, в том числе признаки состояния оборудования, пороговые сигналы текущих значений аналоговых датчиков, аварийной и предупредительной сигнализации, управляющие воздействия схем управления, регулирования и защит на исполнительном механизме котла.

Управление исполнительными механизмами осуществляется через низковольтные коммутирующие устройства (НКУ), которые обеспечивают коммутацию рабочего напряжения электропривода исполнительного механизма по сигналам от устройства управления или по команде оператора с пультов системы управления. Управление исполнительными механизмами в автоматическом режиме обеспечивает установку арматуры в открытое и закрытое положение, останов запорного устройства арматуры в любом промежуточном положении, автоматическое отключение привода при достижении запорным устройством арматуры крайних положений, плотное закрытие запорной арматуры с созданием гарантированного усилия на уплотнительных поверхностях рабочего органа, блокировку взаимоисключающих команд управления (открыть и закрыть), выдачу

сигналов крайних положений и аварийных отключений привода (заклинивание, перегрузка и т.д.).

Электроприводы задвижек и запорных вентилей оснащены концевыми выключателями, определяющими крайние положения "открыто" и "закрыто".

Управление регулирующими устройствами предполагает формирование сигналов управления «больше/меньше» различной длительности (широотно-импульсная модуляция). Исполнительные механизмы регулирующих клапанов (МЭО) и встроенные электроприводы регулирующих клапанов оборудованы аналоговыми датчиками для индикации положения рабочего органа.

Перечень исполнительных механизмов котла представлен в приложении (таблица 2).

Средства автоматизации (исполнительные механизмы, приборы контроля и измерения теплотехнических параметров и состояния исполнительных механизмов) с технологическим оборудованием можно условно разделить на следующие функциональные группы:

- пароводяной тракт котла;
- горелка и топливопроводы котла;
- воздухогазоходы котла.

Оборудование пароводяного тракта обеспечивает питание котла водой, поддержание требуемых значений уровня воды в барабане и солесодержания котловой воды, выработку пара, его перегрев и отвод перегретого пара потребителю.

Пароводяной тракт котла включает узел питания, экономайзер, два барабана котла с системой опускных и испарительных труб, линию непрерывной продувки барабана котла, линию аварийного слива воды из барабана, пароперегреватель и паропроводы, обеспечивающие отвод вырабатываемого пара.

Котел оборудован газомазутной горелкой ГМ-20Х и топливопроводом, которые обеспечивают работу котла на газообразном топливе.

Горелка ГМ-20Х комплектуется электрогазовым запальником. Запальник имеет встроенные электрод зажигания и контрольный электрод ионизационного датчика. Автоматика котла включает высоковольтный трансформатор розжига для получения искры зажигания и прибор контроля пламени ФЭСП-2 для преобразования сигнала ионизационного датчика о наличии пламени запальника в стандартный сигнал типа «сухой» контакт.

Контроль наличия факела горелки осуществляется тем же прибором ФЭСП-2, который включает низкочастотный фотодатчик. Для крепления ФЭСП-2 горелка "оборудована визирной трубой с фланцем.

На горелке установлены отборные устройства для подключения показывающих напорометров (207 и 208) для визуального контроля давления периферийного и внутреннего воздуха горелки, устанавливаемых по месту в непосредственной близости от горелки.

Топливопровод котла служит для подачи газообразного топлива на запальник и горелку котла и оснащен блоком газовым БГ-8.01. Ду 150.

Газовоздуховоды (газовоздушный тракт) и тягодутьевое оборудование котла обеспечивают подачу воздуха на горелку в количестве, необходимом для оптимального горения, отвод продуктов сгорания (дымовых газов) и поддержание заданного разрежения в топке.

Функциональная схема регулятора давления воздуха приведена на рисунке 1.2.

Исполнительными механизмами газовоздуховодов являются:

- дутьевой вентилятор (ДВ);
- направляющий аппарат вентилятора с МЭО (ИМ3);
- дымосос котла (ДС);
- направляющий аппарат дымососа с МЭО (ИМ4).

Для включения тепловой защиты и контроля состояния вентилятора и дымососа служит аппаратура управления двигателем (АУД) тягодутьевых машин. АУД выбирается проектом привязки и включает оборудование частотного регулирования скорости вращения тягодутьевых машин, а также



схему контроля состояния двигателя вентилятора или дымососа. Схема контроля состояния обеспечивает формирование дискретного сигнала типа «сухой» контакт (КС) об отключении двигателя. Сигнал формируется при любом отключении двигателя, в том числе при срабатывании тепловой защиты или защиты по максимальному току двигателя. В частности, для контроля включенного состояния двигателей могут быть использованы выходные дискретные сигналы частотного регулятора.

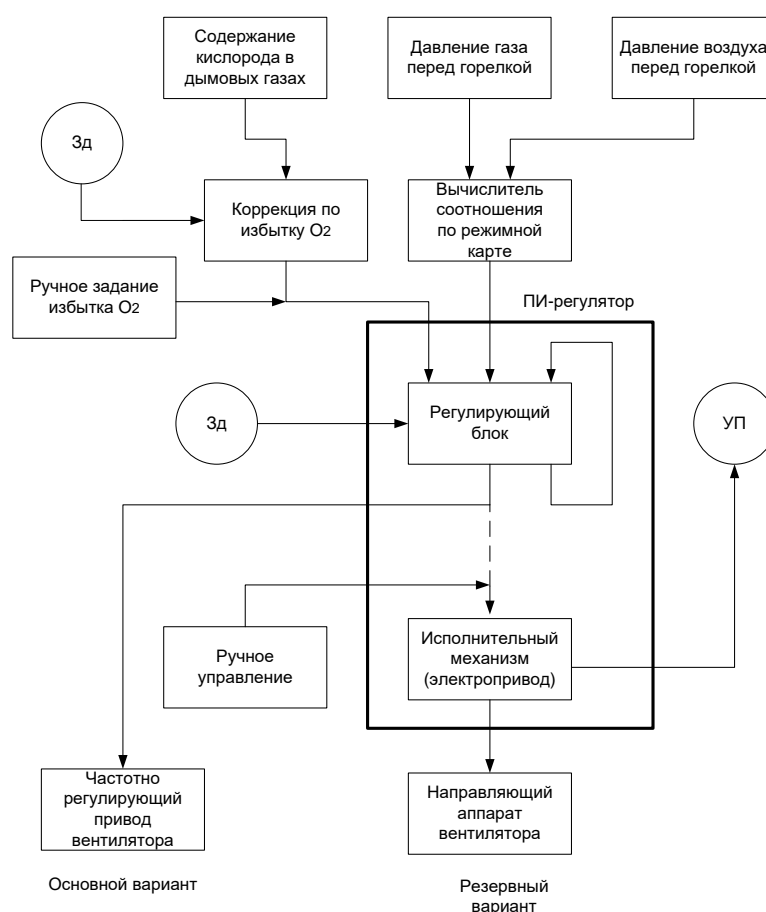


Рисунок 1.2 – Функциональная схема регулятора давления воздуха

Газовоздуховоды оснащаются приборами и датчиками для контроля следующих параметров:

- температура воздуха перед горелкой (114);
- давление воздуха перед горелкой (206,224,231);
- разрежение в топке (210,225,232);
- температура дымовых газов до (115) и после экономайзера (116);

- разрежение перед дымососом (211);
- содержание кислорода в дымовых газах за котлом (512).

Датчик температуры воздуха перед горелкой обеспечивает визуальный контроль текущего значения параметра на щите управления и формирование сигналов предупредительной сигнализации оснижении температуры. При наладке необходимо учитывать, при какой температуре воздуха составляется режимная карта, и отклонение от этого значения на 20°С должно вызывать предупредительную сигнализацию.

Приборы контроля давления воздуха перед горелкой обеспечивают визуальный контроль текущего значения параметра по месту и на щите управления, формирование сигналов предупредительной и аварийной сигнализации оснижении давления и используются при регулировании пускового давления воздуха перед горелкой и соотношения топливо-воздух. Сигнал датчика содержания кислорода служит корректирующим сигналом при регулировании оптимального соотношения топливо-воздух.

Приборы контроля разрежения в топке обеспечивают визуальный контроль по месту и на щите управления, формирование сигналов предупредительной и аварийной сигнализации о снижении разрежения (отсутствии тяги) и используются для поддержания постоянного разрежения в топке. Датчик температуры дымовых газов за экономайзером обеспечивает визуальный контроль текущих значений параметра и включение предупредительной сигнализации при повышении температуры.

### **1.1. Управление исполнительными механизмами котла**

Управление котлом в автоматическом режиме осуществляется через управление исполнительными механизмами котла, оборудованными электроприводами.

К исполнительным механизмам типа «электропривод с датчиком состояния» относятся тягодутьевые машины, управление которыми осуществляется с помощью специальной аппаратуры управления двигателями (АУД) ИМ. В

состав АУД входят коммутирующие устройства, обеспечивающие включение и отключение двигателя по команде устройства управления, защитное отключение при нарушении режима работы двигателя (например, перегрузка) и средства контроля состояния двигателя (КС), которые обеспечивают формирование достоверного сигнала о состоянии двигателя. Порядок управления определяется схемой АУД и может осуществляться как одной командой «включить/отключить», так и формированием отдельных команд «включить» и «отключить» по двум каналам управления.

При управлении исполнительным механизмом данного типа выдача сигнала от датчика состояния. Сигнал от датчика состояния «двигатель включен» должен измениться через время, необходимое на выполнение выданной команды (уточняется при наладке). Несоответствие сигнала состояния исполнительного механизма текущей команде по истечении контрольного времени вызывает формирование сигнала о неисправности исполнительного механизма и включение предупредительной сигнализации.

В проекте управление скоростью вращения двигателя тягодутьевых машин осуществляется дискретным сигналом в виде двоичного цифрового кода.

Управление исполнительными реверсивными механизмами запорной арматуры осуществляется с помощью низковольтных коммутирующих устройств (НКУ), которые обеспечивают включение в прямом и обратном направлении, отключение двигателя по команде устройства управления, защитное отключение при нарушении режима работы двигателя (например, перегрузка). При этом нештатное отключение двигателя, неисправность НКУ, вызывающая потерю управления исполнительным механизмом, в том числе отключение питания, должно сопровождаться формированием сигнала предупредительной сигнализации.

Для управления исполнительным механизмом устройство управления выдает на НКУ команды «открыть», «стоп» и «закрыть». По команде «открыть» НКУ включает двигатель для перемещения запорного органа арматуры в положение «открыто», по команде «закрыть» - для перемещения

запорного органа арматуры в положение «закрыто», и обеспечивает автоматический останов двигателя в крайних положениях. При выполнении команды «закрыть» аппаратура НКУ реализует «плотное» закрытие арматуры, т.е. обеспечивает при закрытии гарантированное усилие на запорном органе за счет применения муфт предельного момента привода или реле максимального тока в составе НКУ. Командой «стоп» запорный орган может быть установлен в любом промежуточном положении.

Управление исполнительными реверсивными механизмами регулирующих устройств (клапаны, затворы, заслонки, направляющие аппараты) также осуществляется с помощью низковольтных коммутирующих устройств (НКУ), которые обеспечивают включение в прямом и обратном направлении, отключение двигателя по команде устройства управления, защитное отключение при нарушении режима работы двигателя (например, перегрузка).

В состав НКУ регулирующих устройств входят бесконтактные реверсивные пускатели типа ПБР, что позволяет применять широтно-импульсную модуляцию с малой длительностью управляющего сигнала для перемещения рабочего органа при регулировании. При этом нештатное отключение двигателя, неисправность НКУ, вызывающая потерю управления исполнительным механизмом, в том числе отключение питания, сопровождается предупредительной сигнализацией «Авария Исполнительного Механизма».

Для контроля положения рабочего органа регулирующего устройства кроме концевых выключателей крайних положений КВО и КВЗ используется аналоговый датчик положения (ДП)) сигнал которого пропорционален степени открытия регулирующего устройства и служит для контроля перемещения рабочего органа при выполнении команд управления «больше» и «меньше».

Приведенный алгоритм управления исполнительными механизмами различного типа дан в общем виде и подлежит уточнению при проектировании

автоматики котла с учетом принятых схем управления и подключения конкретных НКУ.

## **1.2. Управление котлом в различных теплотехнических состояниях**

Управление котлом в автоматическом режиме заключается в выполнении требуемой последовательности технологических операций под управлением автоматики для поддержания заданных теплотехнических параметров, выполнения команд оператора и защиты оборудования. Технологический алгоритм определяет последовательность действий при управлении котлом в зависимости от состояния оборудования. Состояние котла определяется состоянием оборудования, характеризуемого сигналами датчиков теплотехнических параметров котла и положения исполнительных механизмов. Предлагаемый алгоритм управления включает следующие теплотехнические состояния котла:

- отключен;
- проверка готовности и установка исполнительного механизма в исходное положение;
- исходное; .
- подготовка к розжигу;
- розжиг;
- прогрев;
- рабочий режим;
- останов.

Смена состояний осуществляется по командам оператора или автоматически по результатам выполнения технологических операций. В автоматическом режиме при нарушении порядка выполнения технологических операций, заданных алгоритмом, и отклонении параметров за допустимые пределы предусматриваются следующие варианты реакции системы на нештатные ситуации:

- включение предупредительной сигнализации;
- блокировка команд управления отдельным исполнительным механизмом;
- приостановка выполнения (блокировка) дальнейших технологических операций до принятия решения оператором о порядке продолжения работы;
- смена состояния (при срабатывании защит - останов котла, переход в состояние останов).

Во всех случаях включается предупредительная звуковая сигнализация, которая сопровождается выдачей сообщения оператору. Причина сигнализации фиксируется и запоминается в хронологическом порядке.

Автоматическое управление котлом начинается по команде оператора. По команде пуска контролируется давление в барабане котла. Если давление выше 0,1 МПа, осуществляется перевод котла в состояние «останов». Если давление в барабане ниже или равно 0,1 МПа, осуществляется переход в состояние «проверка готовности и установка исполнительных механизмов в исходное положение».

В состоянии котла «проверка готовности и установка исполнительных механизмов в исходное положение» осуществляется проверка текущих значений технологических параметров и состояния оборудования котла. При этом текущие значения параметров сравниваются с уставками, а исполнительные механизмы переводятся в исходное положение.

Установка исполнительных механизмов котла в исходное состояние выполняется одновременно. При выявлении неисправности исполнительных механизмов или невозможности выполнения команд, а также при несоответствии текущих значений технологических параметров, указанных выше, включается предупредительная сигнализация, работа с остальными исполнительными механизмами продолжается.

Котел автоматически переводится в состояние «Исходное» при успешном выполнении действий по установке исполнительных механизмов в исходное положение и соответствии основных параметров следующим значениям:

- давление пара в барабане P222 ниже L1 (0,1 МПа);
- уровень воды в барабане в пределах диапазона  $\pm 75$  мм от среднего рабочего уровня;
- давление воздуха перед горелкой P224 ниже LA (0,15 кПа);
- пламя запальника отсутствует;
- факел горелки отсутствует;
- давление газа между клапанами ПЗК1 и ПЗК2 P226 ниже LA (0,5 кПа);
- давление газа перед горелкой P227 ниже LA (0,5 кПа).

При нарушении условий завершения операций переход в состояние «исходное» блокируется. В этом случае по команде оператора повторяется выполнение операций по установке оборудования котла в исходное положение после устранения причин неисправности исполнительных механизмов и восстановления рабочих значений параметров или котел переводится в состояние «останов».

Состояние котла «исходное» характеризует готовность котла к пуску в работу в автоматическом режиме. Из состояния «Исходное» при отсутствии блокировок оператор может перевести котел в состояние «Подготовка к розжигу» или командой «Останов котла» в состояние «отключен».

Подготовка начинается с включения тягодутьевого оборудования. Операции пусковой вентиляции и опрессовка газопровода выполняются одновременно.

Включение тягодутьевого оборудования выполняется в следующем порядке. Сначала включается дымосос ДС и регулятор разрежения в топке. Регулятор поддерживает заданное значение разрежения в топке, изменяя скорость вращения двигателя дымососа или воздействуя на направляющий аппарат дымососа. При включении дымососа разрежение в топке, как правило, значительно ниже требуемого значения -20...-40 Па и может выйти за пределы нижнего диапазона прибора (-200 Па), что не является нарушением режима, направляющий аппарат при этом остается закрытым.

После завершения разгона дымососа включается вентилятор котла ДВ и регулятор пускового давления воздуха перед горелкой. Регулятор поддерживает заданное значение давления воздуха перед горелкой, изменяя скорость вращения двигателя вентилятора или воздействуя на направляющий аппарат вентилятора. Значение пускового давления воздуха выбирается при наладке, чтобы обеспечить количество подаваемого в топку воздуха в объеме 25...30% от номинального. Давление воздуха при этом должно быть выше уставки предупредительной сигнализации 0,15 кПа. После включения регулятора давления воздуха дается время 20...40 секунд (уточняется при наладке) на установление рабочих значений параметров.

По окончании операций стадии включения тягодутьевого оборудования осуществляется переход на стадию пусковой вентиляции.

На стадии «пусковая вентиляция» осуществляется контроль следующих параметров:

- дымосос и вентилятор включены;
- разрежение в топке имеет рабочее значение ( $-100 \text{ Па} < P_t < -5 \text{ Па}$ );
- давление воздуха перед горелкой выше 0,15 кПа.

При соответствии параметров требуемым значениям начинается отсчет времени пусковой вентиляции топки и газоходов котла. Время пусковой вентиляции-10 минут (уточняется при выполнении пусконаладочных работ). Отключение дымососа или вентилятора вызывает автоматический останов котла действием защит. Отклонение параметров разрежения в топке и давления воздуха за указанные пределы вызывает включение предупредительной сигнализации и приостановку отсчета времени вентиляции.

Одновременно со стадией «пусковая вентиляция» выполняются технологические операции стадий «подготовка пароводяного тракта» и «опрессовка газопровода».

При выполнении технологических операций стадии подготовки оборудования пароводяного тракта осуществляется контроль параметров,



ввод локальных защит по уровню (перелив и упуск воды) в барабане котла, установка арматуры в определенное положение и стабилизация уровня воды в барабане.

Несоответствие параметров ожидаемым значениям вызывает включение предупредительной сигнализации, дальнейшее выполнение операций опрессовки газопровода блокируется. Выполнение операций опрессовки может быть продолжено только по команде оператора «повторить опрессовку» после устранения причин блокировки.

После успешного завершения технологических операций по стадиям в состоянии котла «подготовка к розжигу» при наличии признаков «Пусковая вентиляция выполнена», «Опрессовка завершена» и рабочих значениях параметров пароводяного тракта формируется сообщение «Готовность к розжигу».

При наличии признака Готовности к розжигу персонал по команде «Выполнить розжиг» переводит котел в состояние «Розжиг». Технологические операции по подготовке к розжигу могут быть прерваны по команде оператора «Останов котла» или автоматически действием защит при отключении любой из тягодутьевых машин. Котел при этом переводится в состояние «Останов».

При выполнении операций розжига вводятся защиты, действующие на останов котла в следующих случаях:

- повышение (понижение) давления газа перед горелкой P227 выше НА (ниже LA);
- понижение давления воздуха ниже LA;
- повышение давления в топке (отсутствие тяги) выше НА.
- погасание факела горелки.

При успешном завершении операций розжига осуществляется автоматический переход в состояние «прогрев».

В состоянии «прогрев» выполняются: регулирование разрежения в топке котла, поддержание пусковых значений давления газа и воздуха перед

горелкой (25...30% тепловой производительности), управление оборудованием пароводяного тракта.

При переходе на стадию подключения паровой нагрузки начинает открываться главная паровая задвижка.

В состоянии "Рабочий режим" котел вырабатывает до 25 тонн в час перегретого пара с номинальными параметрами (3,9 МПа и 410...450°C).

Устойчивая работа котла достигается автоматическим регулированием основных технологических параметров.

В состоянии «рабочий режим» включены все защиты котла, и отклонение параметров за допустимые пределы вызывает останов котла действием защит.

Регулирование соотношения «топливо-воздух» должно обеспечивать подачу воздуха на горелку в соответствии с режимной картой. Регулятор формирует управляющее воздействие на исполнительном механизме направляющего аппарата вентилятора (ИМ2) или цифровой сигнал в виде двоичного кода для управления скоростью вращения двигателя вентилятора через частотный преобразователь. Регулирование соотношения осуществляется по давлению топлива и воздуха перед горелкой. При этом задание регулятору соотношения (давления воздуха) формируется по текущему давлению топлива по режимной карте, определяющей соотношение давления «топливо-воздух» (рисунок 1.3).

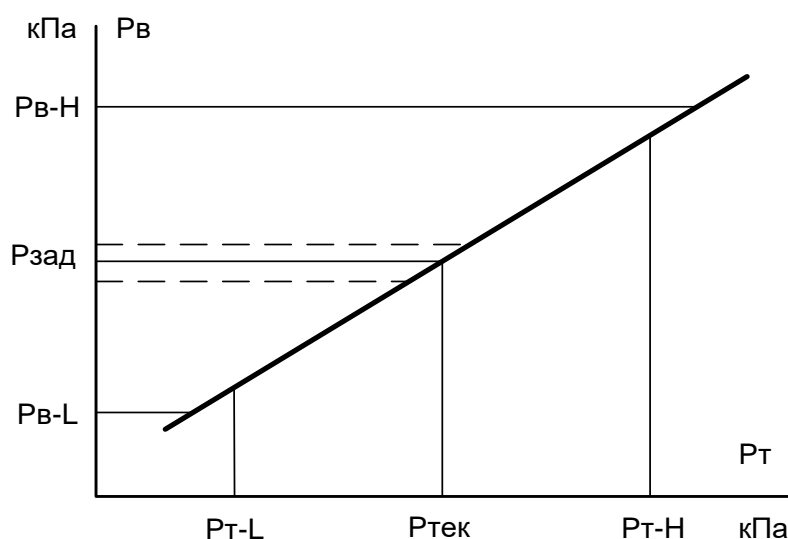


Рисунок 1.3- Характеристика соотношения «топливо-воздух»

В случае если зависимость оптимального соотношения давлений топлива и воздуха нелинейная, график строится по нескольким точкам с линейной аппроксимацией между соседними точками. По заданной зависимости устройство управления определяет требуемое давление воздуха перед горелкой ( $P_{зад}$ ) по текущему значению давления топлива ( $P_{тек}$ ). Одновременно определяются верхняя ( $P_{вдв}$ ) и нижняя ( $P_{вдн}$ ) границы допустимого отклонения давления воздуха при данном давлении топлива.

Если в процессе регулирования текущее значение давления воздуха выходит за границы допустимых отклонений, выполняется блокировка управления исполнительным механизмом подачи топлива регулятора тепловой производительности с учетом направления движения. Так, если  $P_v < P_{вдн}$ , то блокируется выполнение команд «больше», а если  $P_v > P_{вдв}$ , то блокируются команды «меньше».

Регулятор соотношения сравнивает  $P_{зад}$  с текущим значением давления воздуха и по сигналу рассогласования формирует управляющее воздействие по ПИ-закону. Для оптимизации процесса сжигания топлива при регулировании соотношения вводится корректирующий сигнал содержания свободного кислорода в уходящих дымовых газах. Увеличение содержания кислорода в уходящих газах вызывает снижение подачи воздуха, снижение содержания кислорода - увеличение подачи воздуха к горелке.

Регулятор разрежения обеспечивает поддержание постоянного заданного значения (-20...-30 Па) разрежения в топке за счет изменения скорости вращения двигателя дымососа или изменения положения ИМ4 направляющего аппарата дымососа.

Из состояния «рабочий режим» котел может быть переведен в состояние «останов» по команде оператора или автоматически действием защит. Котел переводится в состояние "Останов" по пусковой команде оператора из

состояния «отключен», если давление в барабане котла больше 0,1 МПа, или по команде «останов котла» из любого состояния после выдачи команды на пуск автоматического управления. Автоматически котел переводится в состояние «останов» действием защит при введенной защите и отклонении параметра за пределы допустимого диапазона. При останове котла автоматикой выполняются операции, обеспечивающие перевод оборудования котла в отключенное состояние и установку в исходное положение исполнительных механизмов. Последовательность операций останова зависит от состояния котла, в котором он находился перед остановом. В общем случае при останове из состояния «рабочий режим» технологические операции останова котла выполняются по стадиям в следующей последовательности:

- отключение регуляторов тепловой производительности котла и соотношения топливо-воздух;
- отключение горелки;
- вентиляция топки;
- отключение тягодутьевого оборудования (ТДО);
- управление оборудованием пароводяного тракта.

Стадии переключения регуляторов и отключения горелки, если она включена, выполняются одновременно. Вентиляция топки и отключение тягодутьевого оборудования выполняется последовательно после отключения горелки.

Управление оборудованием пароводяного тракта начинает выполняться после погасания факела и осуществляется одновременно с операциями остальных стадий.

Успешное выполнение технологических операций останова котла завершается переходом котла в состояние "отключен"

Из состояния «останов» при выполнении определенных условий по команде оператора на пуск котла, котел может быть переведен в состояние «подготовка к розжигу». Команда на пуск может быть подана только после успешного завершения операций по отключению горелки, и порядок перехода зависит от состояния тягодутьевого оборудования.



### **1.3. Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода для вентилятора**

Дутьевые вентиляторы являются механизмами длительного режима работы, нагрузка на валу приводного двигателя спокойная, перегрузок в установившемся режиме не возникает. Вентиляторы являются механизмами, обладающими большим моментом инерции, что необходимо учитывать при расчете пусковых характеристик электроприводов.

Пуск вентилятора может производиться как при разгруженной машине (закрит направляющий аппарат), так и при нормальной работе на сеть. В первом случае максимальный момент при пуске равен примерно 0,5 номинального, во втором – номинальному. При пуске мощных вентиляторов с большим диаметром рабочего колеса обычно требуется ограничение ускорений при пуске во избежание появления чрезмерных динамических напряжений в лопатках рабочего колеса и резкого возрастания пускового тока.

Анализ аэродинамических характеристик вентилятора показывает, что при уменьшении расхода воздуха по условиям технологического процесса изменением положения заслонок даже до  $60^\circ$ - $50^\circ$  не приводит к снижению потребляемой мощности из сети, а только уменьшает расход (т.е. отдаваемую мощность). Эффективное снижение потребляемой мощности при уменьшении расхода по требованиям технологического процесса возможно только при снижении скорости электродвигателя. В связи с этим особое значение для дутьевых вентиляторов имеет применение регулируемого электропривода, т. к. по некоторым источникам КПД вентиляторов при регулируемом электроприводе должно быть больше, чем при нерегулируемом в среднем на 15–20% [3].

Наиболее эффективным средством модернизации при работе агрегата с приводом от имеющегося асинхронного электродвигателя является применение частотно-регулируемого привода.

Кроме повышения КПД, применение регулируемого привода для вентиляторов позволяет в ряде случаев упростить конструкцию турбомашин, исключив направляющий аппарат. Кроме улучшения энергетических характеристик, значительно изменяются эксплуатационные показатели: увеличивается межремонтный цикл из-за снижения механических нагрузок и смягчения пусковых режимов, легко выбирается необходимый технологический режим и обеспечивается параллельная работа вентиляторов.

Система управления тягодутьевым механизмом включает несколько частотных преобразователей (управление приводом дымососов и вентиляторов), датчики разрежения и датчики давления, пульт управления оператора.

Использование частотного регулирования электроприводов тягодутьевых механизмов обеспечивает:

- автоматическое поддержание на заданном уровне разрежения на выходе котла и давления подаваемого в котел воздуха во всех режимах работы (розжиг/останов котла, работа при различном количестве включенных горелок);

- устойчивый автоматический розжиг котла без отрыва пламени. Время розжига меньше по сравнению с ручным управлением.

При автоматическом поддержании параметров наряду с экономией электроэнергии обеспечивается оптимальный режим работы котельной, минимизация вредных выбросов в атмосферу, увеличение срока службы оборудования.

Модернизация действующих котельных производится с минимальными изменениями существующей структуры: частотные преобразователи включаются в разрыв силовой сети 380 В между пусковой аппаратурой и электродвигателями. Дроссельные заслонки в каналах дымососа и вентилятора полностью открыты.

В контрольных точках устанавливаются датчики разрежения и давления воздуха, сигналы с которых подаются на входы соответствующих частотных

преобразователей, образуя замкнутые системы автоматического регулирования.

Система преобразователь частоты–асинхронный двигатель создает дополнительные возможности:

- обеспечивает программируемую защиту электродвигателя от перегрузок в рабочих и аварийных режимах;

- обеспечивает перепрограммирование режимов плавного пуска и торможения электродвигателя;

- предусматривает возможность автоматического (программируемого) перевода системы в режим экономии электроэнергии при работе с моментом нагрузки меньше номинального;

- повышает надежность оборудования, увеличивает срок службы основного технологического оборудования.



## 2.ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ

### 2.1. Аэродинамические характеристики и параметры вентилятора ВДН-12,5У

Вентилятор ВДН-12,5У имеет диаметр рабочего колеса  $D = 1250 \text{ мм}^2$  и скорость вращения колеса 980 об/мин, что определяет непосредственное соединение с электродвигателем. Момент инерции вентилятора  $J_{\text{вент}} = 2,4 \text{ Н·м}$ .

Область аэродинамических характеристик вентилятора ВДН-12,5У приведена на рисунке 2.1. Характеристики вентилятора приведены для параметров воздуха при нормальных атмосферных условиях.

По аэродинамическим характеристикам для выбранной точки работы  $i$  определяются производительность, создаваемое давление и КПД вентилятора.

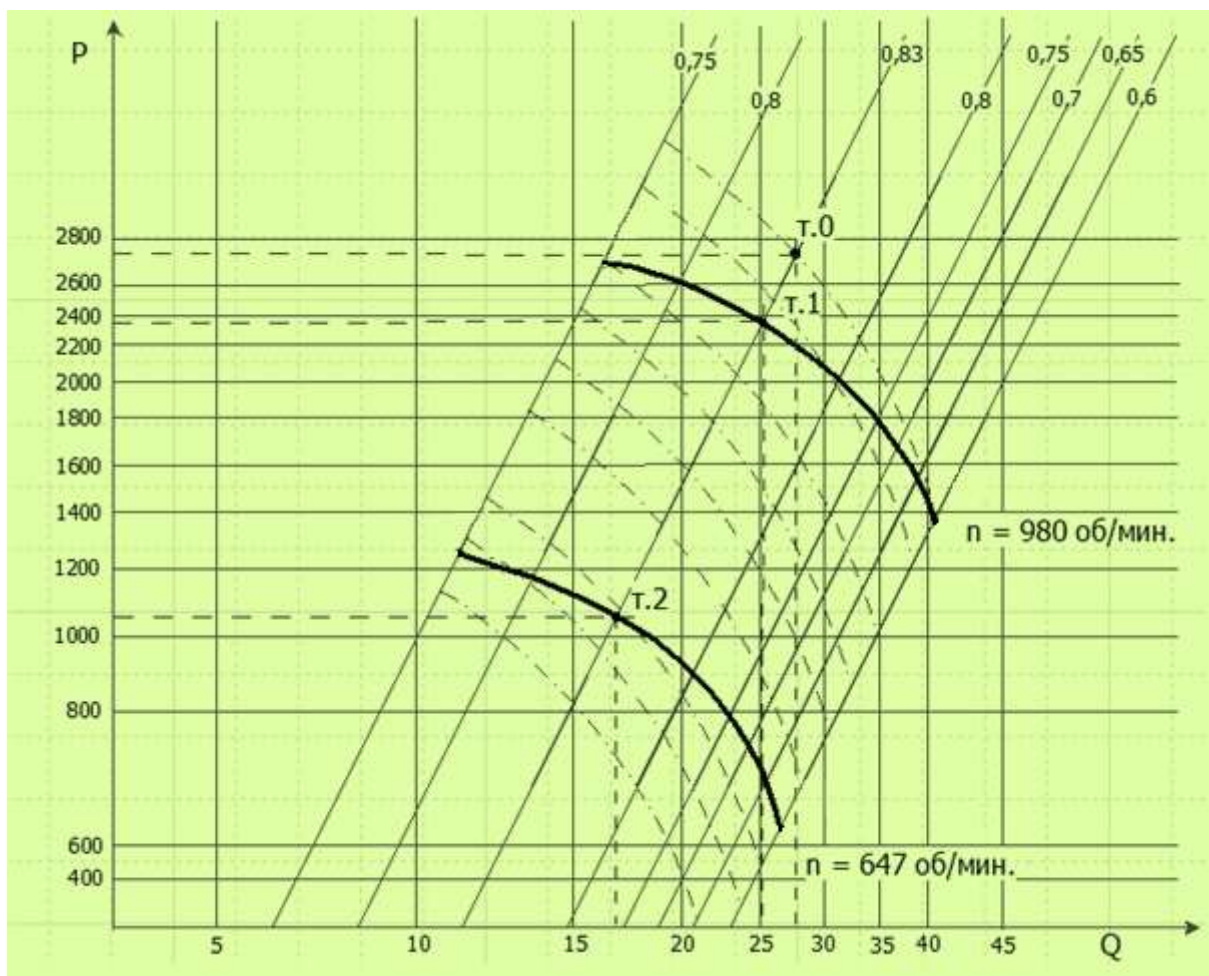


Рисунок 2.1 – Область аэродинамических характеристик вентилятора ВДН-12,5У

Полная и полезная мощность и полный и полезный момент на валу вентилятора, а также скорость вращения приводного двигателя определяются расчетным путем по приведенным ниже расчетным выражениям.

Полная мощность на валу

$$N_{\text{вал}i} = N_{\text{баз}} \cdot \frac{Q_i}{Q_{\text{баз}}} \cdot \frac{p_i}{p_{\text{баз}}} \cdot \frac{\eta_{\text{баз}}}{\eta_i}, \text{ Вт.}$$

Полезная мощность на валу вентилятора

$$N_{\text{пол}i} = N_{\text{вал}i} \cdot \eta_i, \text{ Вт.}$$

Скорость вращения приводного двигателя в выбранной точке работы

$$\omega_i = \omega_{\text{баз}} \cdot \frac{Q_i}{Q_{\text{баз}}} \text{ или } \omega_i = \omega_{\text{баз}} \cdot \sqrt{\frac{p_i}{p_{\text{баз}}}}, \text{ рад/с.}$$

Полный момент нагрузки на валу вентилятора

$$M_{\text{вал}i} = \frac{N_{\text{вал}i}}{\omega_i}, \text{ Н·м.}$$

Полезный момент нагрузки на валу вентилятора

$$M_{\text{пол}i} = \frac{N_{\text{пол}i}}{\omega_i}, \text{ Н·м.}$$

**Расчет параметров вентилятора в рабочих точках т.1 и т.2 при максимальном  $\eta = 0,83$**

Параметры базовой точки т.0 (общей для расчета мощности во всех точках работы вентилятора):

$$Q_{\text{баз}} = 27800 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad p_{\text{баз}} = 2738 \text{ Па}, \quad \eta_{\text{н}} = 83 \%, \quad N_{\text{баз}} = 30000 \text{ Вт.}$$

**Точка 1-** точка номинального режима работы вентилятора. Параметры т.1 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_{\text{н}} = 25200 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad p_{\text{н}} = 2350 \text{ Па}, \quad \eta_{\text{н}} = 83 \%,$$

$$n_{\text{н}} = 980 \text{ об/мин или } \omega_{\text{н}} = 102,625 \text{ рад/с.}$$

Расчетные параметры в т.1:

– полная мощность на валу

$$N_{\text{вал1}} = 30000 \cdot \frac{25200}{27800} \cdot \frac{2350}{2738} \cdot \frac{0,83}{0,83} = 23340,57 \text{ Вт};$$

– полезная мощность на валу вентилятора

$$N_{\text{пол1}} = 23340 \cdot 0,83 = 19373 \text{ Вт};$$

– полный момент нагрузки на валу вентилятора

$$M_{\text{вал1}} = \frac{23340}{102,625} = 227,435 \text{ Н·м};$$

– полезный момент нагрузки на валу вентилятора.

$$M_{\text{пол1}} = \frac{19373}{102,625} = 188,771 \text{ Н·м}.$$

**Точка 2.** Параметры т.2 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора.

$$Q_{\text{т.2}} = 16700 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad p_{\text{т.2}} = 1066 \text{ Па}, \quad \eta_{\text{н}} = 83 \%,$$

$$n_{\text{т.2}} = 647 \text{ об/мин или } \omega_{\text{т.2}} = 67,754 \text{ рад/с}.$$

Расчетные параметры в т.2:

– полная мощность на валу

$$N_{\text{вал2}} = 30000 \cdot \frac{16700}{27800} \cdot \frac{1066}{2738} \cdot \frac{0,83}{0,83} = 7016,44 \text{ Вт};$$

– полезная мощность на валу вентилятора

$$N_{\text{пол2}} = 7016 \cdot 0,83 = 5823,64 \text{ Вт};$$

– полный момент нагрузки на валу вентилятора

$$M_{\text{вал2}} = \frac{7016}{67,754} = 103,558 \text{ Н·м};$$

– полезный момент нагрузки на валу вентилятора.

$$M_{\text{пол2}} = \frac{5824}{67,754} = 85,953 \text{ Н·м}.$$

## 2.2. Механические характеристики вентилятора

***Механическая характеристика вентилятора при работе в номинальном режиме и  $\eta = 0,83$  (точки т.1 и т.2)***

Номинальный режим работы вентилятора соответствует максимальному значению полного КПД и характеризуется следующими параметрами:

- номинальный КПД  $\eta_H = 83 \%$ ;
- номинальная скорость вращения  $n_H = 980$  об/мин;
- номинальная производительность  $Q_H = 25200$  м<sup>3</sup>/ч;
- номинальное давление  $p_H = 2350$  Па.

Выражение для механической характеристики вентилятора при работе с постоянным значением КПД  $\eta_i$  имеет следующий вид:

$$M_{\text{с.вент}i}(\omega) = a_i \cdot M_{\text{пол}i} + (1 + b_i) \cdot M_{\text{пол}i} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^x,$$

где  $a_i$  и  $b_i$  – коэффициенты постоянных и переменных потерь вентилятора в режиме работы с постоянным значением  $\eta_i$ ;

$$a_i \cdot M_{\text{пол}i} = \Delta M_{\text{пост}} = \text{const}$$

– момент постоянных потерь на валу вентилятора.

Из условия равенства постоянных и переменных потерь вентилятора в номинальном режиме работы (т. 1) определим значения коэффициентов потерь при работе вентилятора с  $\eta_H = 0,83$  (точки работы т. 1 – т. 2) [15]:

$$a_H = b_H = \frac{1 - \eta_H}{2 \cdot \eta_H} = \frac{1 - 0,83}{2 \cdot 0,83} = 0,102$$

Тогда момент постоянных потерь на валу вентилятора

$$\Delta M_{\text{пост}} = a_H \cdot M_{\text{пол.н}} = 0,102 \cdot 188,771 = 19,332 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Из условия

$$M_{\text{вал.2}} = \Delta M_{\text{пост}} + (1 + b_{\text{н}}) \cdot M_{\text{полн}} \cdot \left( \frac{\omega_{\text{т.2}}}{\omega_{\text{н}}} \right)^x$$

после подстановки численных значений

$$103,558 = 19,332 + (1 + 0,102) \cdot 188,771 \cdot \left( \frac{67,754}{102,625} \right)^x$$

и решения уравнения относительно  $x$  определим значение показателя степени механической характеристики вентилятора при регулировании производительности с номинальным значением КПД  $\eta_{\text{н}} = 0,83$ ,  $x = 2,18$ .

В результате получаем общее выражение для механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с номинальным значением КПД  $\eta_{\text{н}} = 0,83$ .

$$M_{\text{с.вент}}(\omega) = 19,332 + (1 + 0,102) \cdot 188,771 \cdot \left( \frac{\omega}{102,625} \right)^{2,18}$$

Механическая характеристика вентилятора приведена на рисунке 2.2. В интервале рабочих скоростей вентилятора выделена область изменения момента сопротивления на валу вентилятора, соответствующая границам заданной области его аэродинамических характеристик (точки т.1- т.2). Из анализа механической характеристики вентилятора делаем вывод, что изменение режима работы вентилятора в пределах заданной области его аэродинамических характеристик не приводит к существенному изменению нагрузки двигателя.

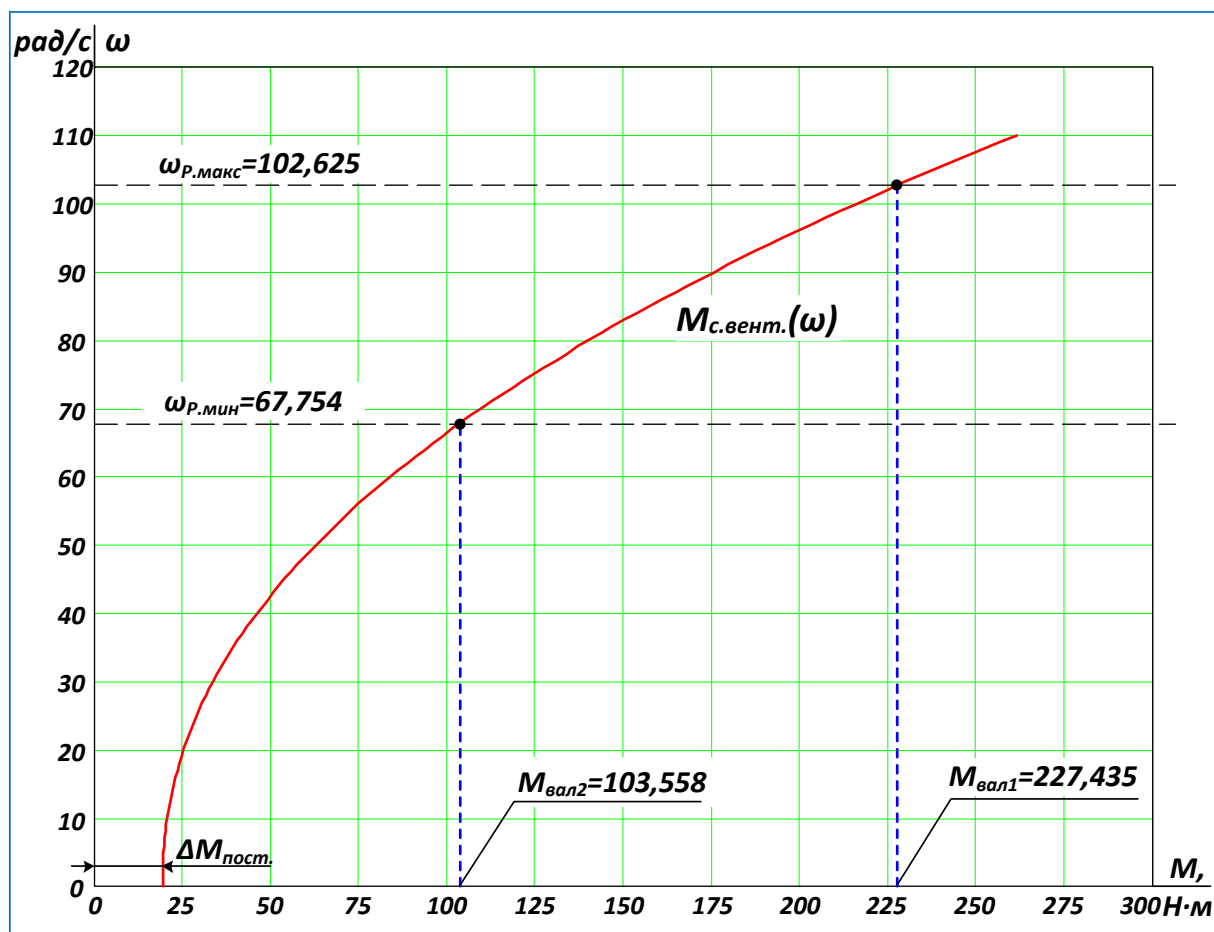


Рисунок 2.2 – Механическая характеристика вентилятора  $M_{с\text{ вент}} = f(\omega)$

### 2.3. Выбор приводного двигателя

Номинальная мощность приводного двигателя должна быть равна или несколько больше мощности на валу вентилятора во всех его возможных технологических режимах работы. В режиме регулирования производительности вентилятор потребляет наибольшую мощность при работе в т.1, где  $N_{вал1} = 23340$  Вт.

Согласно [10] при синхронной скорости 1000 об/мин ближайшим большим по мощности является электродвигатель 5A200L6, номинальная мощность которого равна 30000 Вт. Заметим, что электродвигатель выбранной мощности удовлетворяет работе вентилятора во всей области аэродинамических

характеристик при нормальных атмосферных условиях. Технические характеристики электродвигателя 5A200L6 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики электродвигателя 5A200L6.

Типо- размер	$n_0$ , об/мин	$U_{1H}$ , В	$P_{дв.н}$ , кВт	При номинальной нагрузке			$s_k$ , %	$J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>
				$s_H$ , %	$\cos\varphi_H$	$\eta_H$ , %		
5A 200 L6	1000	380	30	0,02	0,84	0,912	0,098	0,46

Продолжение таблицы 2.1

$m_{II} = \frac{M_{пуск}}{M_H}$	$m_K = \frac{M_{макс}}{M_H}$	$m_M = \frac{M_{мин}}{M_H}$	$k_{i_{дв}} = \frac{I_{пуск}}{I_H}$	Степень защиты
2,4	2,4	1	6,5	IP54



Рис. 2.3 – Электродвигатель промышленный 5A200L6.

Расчетные параметры электродвигателя

Номинальное скольжение

$$s_H = \frac{n_0 - n_{\text{дв.н}}}{n_0} = \frac{1000 - 980}{1000} = 0,02$$

Синхронная угловая частота вращения электродвигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,72 \text{ рад/с.}$$

Номинальная угловая частота вращения электродвигателя

$$\omega_{\text{дв.н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{дв.н}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 980}{30} = 102,625 \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент электродвигателя

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{30000}{102,625} = 292,325 \text{ Н·м.}$$

Номинальное фазное напряжение статора

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

Номинальный линейный ток статора

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \phi_H \cdot \eta_H} = \frac{30000}{3 \cdot 220 \cdot 0,84 \cdot 0,912} = 59,33 \text{ А.}$$

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске

$$I_{1\text{макс}} = k_{i,\text{дв}} \cdot I_{1\text{фн}} = 5,8 \cdot 59,33 = 344,137 \text{ А.}$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике

$$M_K = m_K \cdot M_{\text{дв.н}} = 2,4 \cdot 292,325 = 701,581 \text{ Н·м.}$$

Пусковой момент электродвигателя при прямом пуске.

$$M_{\text{дв.пуск}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{дв.н}} = 2,4 \cdot 292,325 = 701,581 \text{ Н·м.}$$

Определение параметров схемы замещения

Параметры схемы замещения определим по методике, изложенной в [16]



Ток холостого хода асинхронного электродвигателя

$$I_0 = I_{1\phi H} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{I_{1p_*}}{I_{1\phi H}}\right)^2 - \left[\frac{p_* \cdot (1-s_H)}{(1-p_* \cdot s_H)}\right]^2}{1 - \left[\frac{p_* \cdot (1-s_H)}{(1-p_* \cdot s_H)}\right]^2}} =$$

$$59,33 \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{46,435}{59,33}\right)^2 - \left[\frac{0,75 \cdot (1-0,02)}{(1-0,75 \cdot 0,02)}\right]^2}{1 - \left[\frac{0,75 \cdot (1-0,02)}{(1-0,75 \cdot 0,02)}\right]^2}} = 21,029 \text{ А},$$

где

$p_* = \frac{P}{P_H}$  – коэффициент загрузки двигателя, о.е; принимаем  $p_* = 0.75$ ;

$\cos \phi_{p_*}$  – коэффициент мощности при частичной нагрузке, о.е;

принимаем  $\cos \phi_{p_*} = 0.805$  [16];

$\eta_{p_*}$  – КПД при частичной нагрузке, о.е; принимаем  $\eta_{p_*} = \eta_H = 0,912$

[16];

$$I_{1p_*} = \frac{p_* \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\phi H} \cdot \cos \phi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 30000}{3 \cdot 220 \cdot 0,805 \cdot 0,912} = 46,435 \text{ А – ток статора}$$

двигателя при частичной нагрузке.

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (1-s_H)}{2 \cdot m_K \cdot P_{\text{двн}} \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_K}\right)} = \frac{0,959}{\left(1,1 + \frac{1}{0,098}\right) \cdot 1,031} = 0,082 \text{ Ом},$$

где

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\text{фн}}} = 1 + \frac{21,029}{2 \cdot 5,8 \cdot 59,334} = 1,031$$

– коэффициент, характеризующий соотношение  $\frac{X_\mu + X_{1\sigma}}{X_\mu}$ ;

$$s_K = s_H \cdot \frac{m_K + \sqrt{m_K^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_K - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_K - 1)} =$$

$$= 0,02 \cdot \frac{2,4 + \sqrt{(2,4)^2 - [1 - 2 \cdot 0,02 \cdot 1,1 \cdot (2,4 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,02 \cdot 1,1 \cdot (2,4 - 1)} = 0,098$$

– критическое скольжение;

$\beta$  – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора, примем  $\beta = 1,1$ .

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,031 \cdot 0,082 \cdot 1,1 = 0,093 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 10,15 \cdot 1,031 \cdot 0,082 = 0,861 \text{ Ом,}$$

где

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,098^2} - 1,1^2} = 10,15.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки, приведенное к обмотке статора

$$X_{2\sigma}' = \frac{0,58 \cdot X_{\text{кн}}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,861}{1,031} = 0,484 \text{ Ом.}$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния

$$L_{2\sigma}' = \frac{X_{2\sigma}'}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{0,484}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00154 \text{ Гн.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 0,861 = 0,361 \text{ Ом.}$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{0,361}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00115 \text{ Гн.}$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания.

$$X_{\mu} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{204,268}{21,029} = 9,713 \text{ Ом,}$$

где

$$E_m = \sqrt{(U_{1\text{фн}} \cdot \cos \phi_{\text{н}} - R_1 \cdot I_{1\text{фн}})^2 + (U_{1\text{фн}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \phi_{\text{н}}} + X_{1\sigma} \cdot I_{1\text{фн}})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,84 - 0,093 \cdot 59,334)^2 + (220 \cdot \sqrt{1 - 0,84^2} + 0,361 \cdot 59,334)^2} = 204,268 \text{ В}$$

– ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме.

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре, создаваемым суммарным действием токов статора (индуктивность контура намагничивания)

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{9,713}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,031 \text{ Гн}$$

### ***Проверка адекватности расчетных параметров двигателя***

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя  $M_{\text{эм.н}}$  и  $M_{\text{эм.н}}^*$ :

$$M_{\text{эм.н}}(s_{\text{н}}) = M_{\text{эм.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\Phi\text{н}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[ X_{\text{кн}}^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,082}{104,72 \cdot 0,02 \cdot \left[ 0,861^2 + \left( 0,093 + \frac{0,082}{0,02} \right)^2 + \left( \frac{0,093 \cdot 0,082}{0,02 \cdot 9,713} \right)^2 \right]} = 309,315 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M^*_{\text{эм.н}} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L'_{2\sigma})} \cdot \Psi_{2\text{н}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\text{н}}^2 - I_0^2} =$$

$$= \frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0,031}{(0,031 + 1,542 \cdot 10^{-3})} \cdot 0,92 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{59,33^2 - 21,03^2} = 309,254 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\text{где } z_p - \text{число пар полюсов, } z_p = \frac{60 \cdot f_{1\text{н}}}{n_{\text{дв.н}}} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3$$

$$\Psi_{2\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 21,03 \cdot 0,031 = 0,92 \text{ Вб}.$$

Должны выполняться условия:

$$M^*_{\text{эм.н}} \approx M_{\text{эм.н}};$$

$$M^*_{\text{эм.н}} = (1,05 \div 1,1) \cdot M_{\text{дв.н}} = (1,05 \div 1,1) \cdot 292,325 = (306,94 \div 321,56) \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По результатам расчета эти условия выполняются [17].

Рассчитанные параметры схемы замещения сведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1$ , Ом	$X_{1\sigma}$ , Ом	$L_{1\sigma}$ , Гн	$X_{\mu}$ , Ом	$L_m$ , Гн	$R'_2$ , Ом	$X'_{2\sigma}$ , Ом	$L'_{2\sigma}$ , Гн	$X_{\text{кн}}$ , Ом
0,093	0,361	0,00115	9,713	0,031	0,082	0,484	0,00154	0,861

## 2.4. Расчёт естественных характеристик электродвигателя

### ***Естественная механическая характеристика двигателя***

Естественная механическая характеристика  $M(s)$  асинхронного двигателя для частоты  $f_{1H} = 50 \text{ Гц}$  рассчитывается по выражению:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ X_{\text{кн}}^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]}; \quad (2.1)$$

где  $M$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

По результатам расчёта построена механическая характеристика  $\omega(M)$  (рисунок 2.3), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s). \quad (2.2)$$

Рассчитаны значения электромагнитного номинального момента

$$\begin{aligned} M_{\text{эм}}(s_H) = M_{\text{эм}} &= \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[ X_{\text{кн}}^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s_H} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,082}{104,72 \cdot 0,02 \cdot \left[ 0,861^2 + \left( 0,093 + \frac{0,082}{0,02} \right)^2 + \left( \frac{0,093 \cdot 0,082}{0,02 \cdot 9,713} \right)^2 \right]} = 309,315 \text{ Н} \cdot \text{м}; \end{aligned}$$

критического скольжения

$$s_K = R'_2 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left( \frac{R_1}{X_\mu} \right)^2}{R_1^2 + (X_{\text{кн}})^2}} = 0,082 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left( \frac{0,093}{9,713} \right)^2}{0,093^2 + (0,861)^2}} = 0,095$$

и электромагнитного критического момента

$$M_{\text{эм.к}}(s_H) = M_{\text{эм.к}} = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{R_1}{X_{\mu}} \right)^2 \right]} \right\}} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,72 \cdot \left( 0,093 + \sqrt{(0,093^2 + 0,861^2) \cdot \left( 1 + \frac{0,093^2}{9,713} \right)} \right)} = 723 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

соответствующие расчетной естественной механической характеристике двигателя.

По выражению (2.1) для скольжения  $s=1$  рассчитано значение электромагнитного пускового момента  $M_{\text{эм.п}}$ .

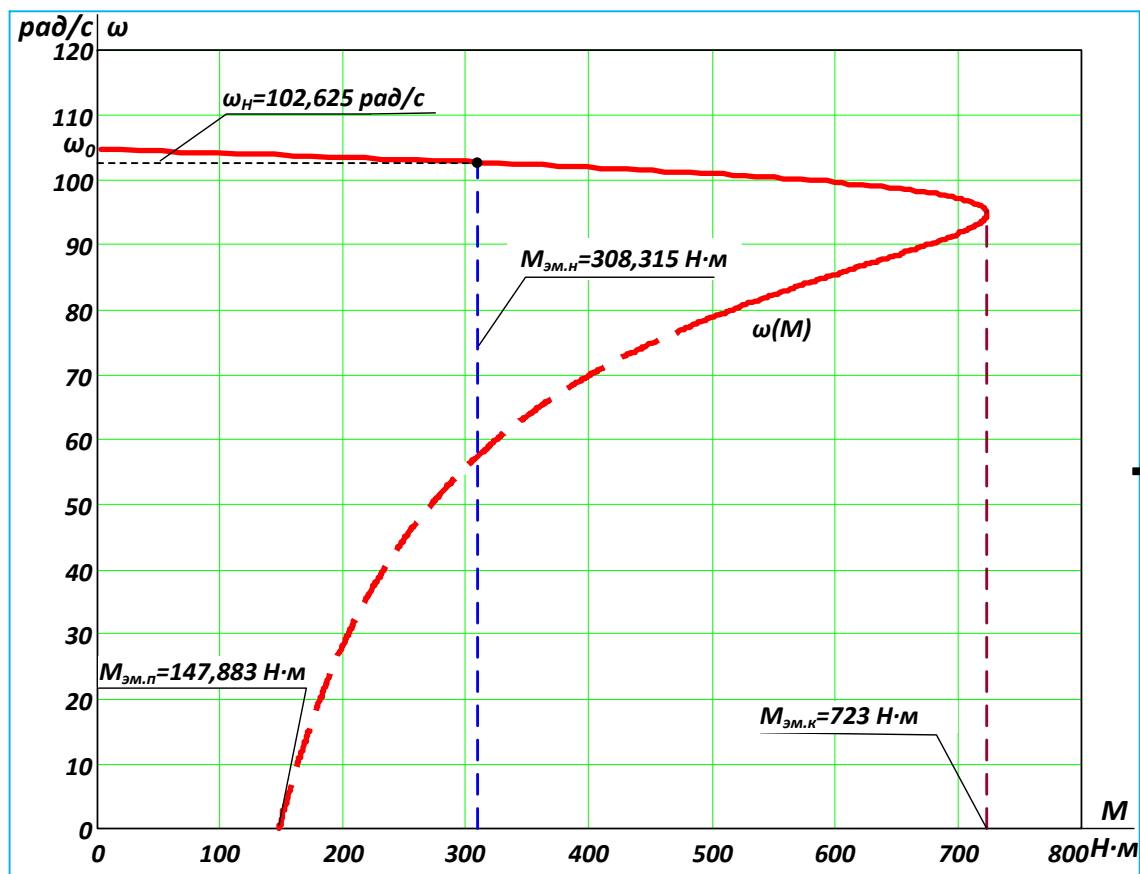


Рисунок 2.3 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя  $\omega(M)$

Поскольку механическая характеристика двигателя рассчитана для электромагнитного момента, то полная нагрузка на валу электродвигателя должна учитывать собственный момент двигателя. Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным:

$$\Delta M_{\text{с.дв}} = M_{\text{эм.н}} - M_{\text{дв.н}} = 309,315 - 292,325 = 16,99 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

### ***Естественная электромеханическая характеристика двигателя***

Естественная электромеханическая характеристика  $I_1(s)$  электродвигателя для частоты  $f_{1н} = 50 \text{ Гц}$  рассчитывается по выражению:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(s)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)} \quad (2.3)$$

где  $I_1 = I_{1\phi}$  – действующее значение фазного тока двигателя, А;

$$\begin{aligned} I_2'(s) &= \frac{U_{1\phi н}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} = \\ &= \frac{220}{\pm \sqrt{\left(0,093 + \frac{0,082}{s}\right)^2 + 0,861^2 + \left(\frac{0,093 \cdot 0,082}{s \cdot 9,713}\right)^2}}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

– приведённый к обмотке статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1\phi н}}{\sqrt{R_1^2 + \left(X_{1\sigma} + X_\mu\right)^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,093^2 + (0,361 + 9,713)^2}} = 21,835 \text{ А}, \quad (2.5)$$

– действующее значение тока холостого хода;

$$\sin \phi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2}} = \frac{0,861}{\sqrt{\left(0,093 + \frac{0,082}{s}\right)^2 + 0,861^2}}. (2.6)$$

По результатам расчёта построены электромеханические характеристики двигателя  $\omega(I_1)$  и  $\omega(I_2')$  (рисунок 2.4), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению (2.2).

По выражениям (2.3) – (2.6) для скольжений  $s = s_H$  и  $s = 1$  рассчитаны значения номинального тока статора  $I_H(s_H)$  и максимального тока двигателя при прямом пуске  $I_{1\max}(s=1)$ .

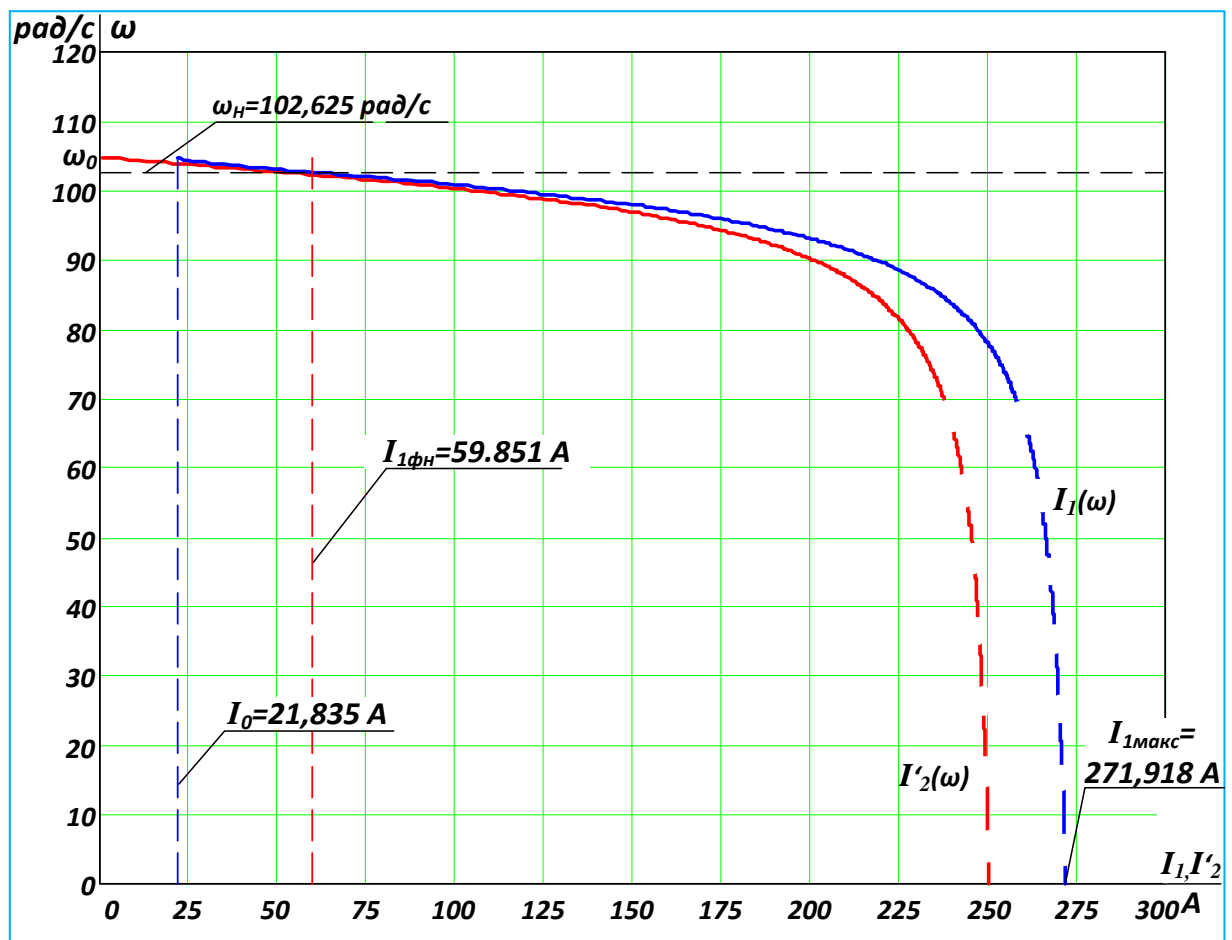


Рисунок 2.4 – Естественные электромеханические характеристики двигателя

$\omega(I_1)$  и  $\omega(I_2')$



## **Оценка достоверности расчётных характеристик двигателя**

В результате расчёта естественных характеристик двигателя получены следующие параметры для их характерных точек:

$$s_H = 2\%; \quad s_K = 9,5\%; \quad I_{1H} = 59,581 \text{ A}; \quad I_{1\text{макс}} = 271,918 \text{ A};$$

$$I_{1\text{макс}}/I_{1H} = 4,56 \text{ A}; \quad M_{\text{эм.н}} = 309,315 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_{\text{эм.к}} = 723 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{эм.к}}/M_{\text{эм.н}} = 2,34; \quad M_{\text{эм.пуск}} = 147,883 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_{\text{эм.пуск}}/M_{\text{эм.н}} = 0,478;$$

Справочные и расчётные параметры двигателя:

$$s_H = 2\%; \quad s_K = 9,8\%; \quad I_{\text{дв.н}} = 59,334 \text{ A}; \quad I_{\text{дв.макс}} = 344,137 \text{ A}$$

$$I_{\text{дв.макс}}/I_{\text{дв.н}} = 5,8; \quad M_{\text{дв.н}} = 292,325 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_K = 701,814 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_K/M_{\text{дв.н}} = 2,4; \quad M_{\text{дв.пуск}} = 701,814 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_{\text{дв.пуск}}/M_{\text{дв.н}} = 2,4$$

Сравнения параметров расчётных характеристик со справочными параметрами двигателя показывают соответствие условиям для их характерных точек  $M_{\text{эм.н}} > M_{\text{дв.н}}$ ,  $M_{\text{эм.к}} > M_K$ . Условие  $M_{\text{эм.пуск}} > M_{\text{дв.пуск}}$  не выполняется, поэтому часть характеристики  $\omega(M)$  показана пунктиром. Так как  $I_{1\text{макс}} < I_{\text{дв.макс}}$ , то на электромеханических характеристиках часть тоже показана пунктиром.

## **2.5. Выбор типа преобразователя и способа регулирования**

Для регулируемого асинхронного электропривода используем преобразователь серии ИРБИ 8ХЗ, фирмы ИРБИС, параметры которого приведены в таблице 2.3 [22].

Таблица 2.3 – Параметры преобразователя частоты ИРБИ 8

Модель	Число фаз на входе	$U_H$ , В	$I_{и.н}$ , А	$I_{и.макс}$ , А	Рекомендуемая мощность двигателя, кВт
ИРБИ 823-30	3	380	63	$1,1 \cdot I_{и.н} = 69,3$	30

Общие технические данные преобразователя частоты ИРБИ 823-30:

- коэффициент мощности 0,8;
- КПД не менее 0,95;
- выходная частота 1÷100 Гц;
- частота ШИМ 0,7÷20 кГц.

Способ управления – векторный.

## 2.6. Структурная схема силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель

Структурная схема силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель реализована во вращающейся двухфазной системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, и приведена на рисунке 2.5. Управляющими сигналами на входе преобразователя структурной схемы силового канала (рисунок 2.5) являются цифровые сигналы в виде двоичного кода. Выходные напряжения преобразователя представляют собой составляющие напряжения статора  $U_{1d}$  и  $U_{1q}$  в ортогональной системе координат  $d, q$ , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора  $\Psi_{2d}$  [17].

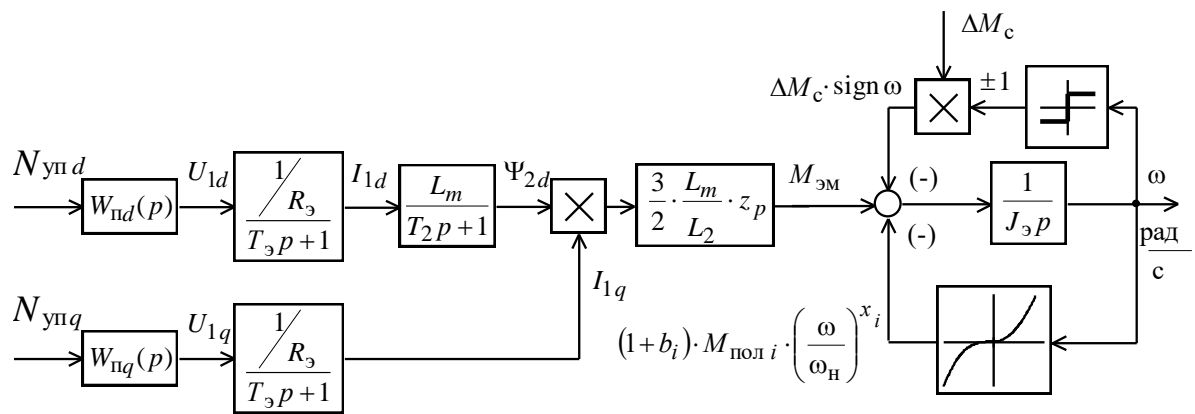


Рисунок 2.5 – Структурная схема силового канала системы преобразователь – асинхронный электродвигатель во вращающейся двухфазной системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, с компенсацией внутренних обратных связей

Расчет параметров структурной схемы двигателя

Эквивалентные индуктивности обмоток

- статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0,00115 + 0,031 = 0,032 \text{ Гн.}$$

- ротора, приведённой к цепи статора

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0,00154 + 0,031 = 0,0325 \text{ Гн.}$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{0,031^2}{0,032 \cdot 0,0325} = 0,082.$$

Эквивалентное сопротивление цепи статора

$$R_{1\text{э}} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L'_2{}^2} = 0,093 + 0,082 \cdot \frac{0,031^2}{0,0325^2} = 0,168 \text{ Ом.}$$

Электромагнитные постоянные времени цепи статора и ротора:

$$T_{1\text{э}} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\text{э}}} = \frac{0,082 \cdot 0,032}{0,168} = 0,016 \text{ с.}$$

$$T_2 = \frac{L'_2}{R'_2} = \frac{0,0325}{0,082} = 0,395 \text{ с.}$$

Расчет параметров механической *системы*

Эквивалентный момент инерции привода

$$J_{\text{э}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{м}} = 0,46 + 2,4 = 2,86 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

где  $J_{\text{м}} = 2,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  момент инерции вентилятора.

## **2.7. Расчёт характеристик разомкнутой системы ПЧ-АД и оценка выполнения заданной области работы электропривода**

### ***Расчет механических характеристик***

1. Механическая характеристика  $\omega(M)$  электродвигателя для значения частоты  $f_1 = f_{1\text{н}}$  рассчитана по выражениям (2.1) и (2.2) и приведена на рисунке 2.6.

2. При векторном управлении потокосцепление ротора поддерживается постоянным, поэтому зависимость максимального момента электродвигателя при  $f_1 \leq f_{1\text{н}}$  рассчитана из условия его равенства электромагнитному критическому моменту  $M_{\text{дв.макс}}(\omega) = M_{\text{эм.к}}(\omega_{\text{к}})$  [17]:

$$M_{\text{дв.макс}}(\omega) = M_{\text{эм.к}}(f_{1\text{н}}) = \text{const},$$

где

$$M_{\text{эм.к}}(f_{1\text{H}}) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фH}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кH}}^2) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{R_1}{X_{\mu}} \right)^2 \right]} \right\}} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,72 \cdot \left( 0,093 + \sqrt{(0,093^2 + 0,861^2)} \right)} = 723 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$\omega \leq \omega_{\text{к}}(f_{1\text{H}}),$$

$$\omega_{\text{к}}(f_{1\text{H}}) = \omega_0 \cdot (1 - s_{\text{к}}(f_{1\text{H}})) = 104,72 \cdot (1 - 0,95) = 94,766 \text{ рад/с},$$

$$s_{\text{к}}(f_{1\text{H}}) = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \left( \frac{R_1}{X_{\mu}} \right)^2}{R_1^2 + (X_{\text{кH}})^2}} = 0,082 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left( \frac{0,093}{9,713} \right)^2}{0,093^2 + (0,861)^2}} = 0,95.$$

Характеристика  $M_{\text{дв.макс}}(\omega)$  приведена на рисунке 2.6.

### ***Расчет электромеханических характеристик***

Электромеханическая характеристика электродвигателя  $\omega(I_1)$  рассчитана по выражениям (2.2) и (2.3)–(2.6) для значения частоты  $f_1 = f_{1\text{H}}$  и приведена на рисунке 2.7

### ***Определение заданной области работы***

В плоскости механической характеристики  $\omega(M)$  рисунка 2.6 рассчитаны и построены:

1. Характеристика статического момента полной нагрузки  $M_{\text{с}}(\omega)$ :

$$M_c(\omega) = M_{c.\text{вент}}(\omega) + \Delta M_{c.\text{дв}} = 19,332 + 208,103 \cdot \left( \frac{\omega}{102,625} \right)^{2,18} + 16,99;$$

2. Зависимость длительно допустимого момента электродвигателя  $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$  (при  $f_{\text{и}} \leq f_{1\text{н}}$ ,  $\omega \leq \omega_{\text{дв.н}}$ ) по выражению:

$$\begin{cases} M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \cdot \left( 0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right) + \Delta M_{c.\text{дв}} & \text{при } \omega_{\text{эп.мин}} \leq \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \\ M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} + \Delta M_{c.\text{дв}} & \text{при } 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega \leq \omega_{\text{дв.н}}, \end{cases}$$

где  $M_{\text{дв.н}} = 292,325 \text{ Н} \cdot \text{м}$

3. Значение максимального электромагнитного момента нагрузки в точке номинального режима работы вентилятора при скорости  $\omega_{\text{н}} = 102,625$  рад/с.

$$M_{c.\text{макс}} = M_{c.\text{вент}}(\omega_{\text{н}}) + \Delta M_{c.\text{дв}} = 19,332 + 208,103 \cdot \left( \frac{102,625}{102,625} \right)^{2,18} + 16,99 = 244,425 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

4. Значение  $M_{\text{эп.макс}}$  соответствующее максимальному току электропривода  $I_{\text{эп.макс}}$ . Для этого на естественной электромеханической характеристике определено соответствующее  $I_{\text{эп.макс}} = I_{\text{и.макс}}$  значение скольжения  $s_{T.1} = \frac{\omega_0 - \omega_{T.1}}{\omega_0} = \frac{104,7 - 102,166}{104,7} = 0,0244$  и при этом скольжении

найден значение максимального электромагнитного момента

$$M_{\text{эм.макс}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{T.2} \cdot \left[ (X_{\text{кн}})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_{T.2}} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{T.2} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,082}{104,72 \cdot 0,0244 \cdot \left[ (0,861)^2 + \left( 0,093 + \frac{0,082}{0,0244} \right)^2 + \left( \frac{0,093 \cdot 0,082}{0,0244 \cdot 9,713} \right)^2 \right]} = 366,561 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

В плоскости электромеханической характеристики  $\omega(I_1)$  рисунка 2.7 рассчитаны и построены:

1. Зависимость длительно допустимого тока электродвигателя  $I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$  по выражениям:

$$\begin{cases} I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{дв.н}} \cdot \left( 0.5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right) & \text{при } \omega_{\text{эп.мин}} \leq \omega \leq 0.5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \\ I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{дв.н}} & \text{при } 0.5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega \leq \omega_{\text{дв.н}}, \end{cases}$$

где  $I_{\text{дв.н}} = 59.334 \text{ А}$ ,

$\omega_{\text{эп.мин}} = 67,754 \text{ рад/с}$ ,

$\omega_{\text{дв.н}} = 102,625 \text{ рад/с}$ .

2. Значение  $I_{\text{с.макс}}$ , соответствующее длительной максимальной нагрузке  $M_{\text{с.макс}}$ . Решив относительно  $s$  уравнение (2.1)

$$\frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ (X_{\text{кн}})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = M_{\text{с.макс}},$$

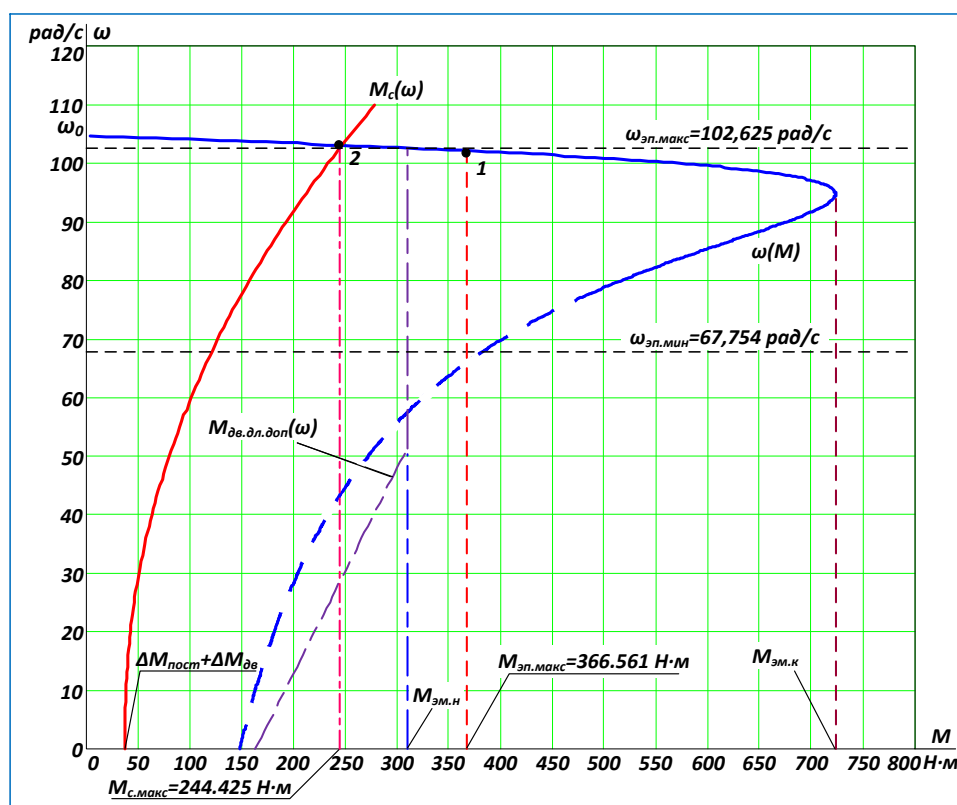
$$\frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,082}{104,72 \cdot s \cdot \left[ (0,861)^2 + \left( 0,093 + \frac{0,082}{s} \right)^2 + \left( \frac{0,093 \cdot 0,082}{s \cdot 9,713} \right)^2 \right]} = 244.425 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

для найденного значения скольжения  $s_{T.2} = 0,0154$  по формулам (2.3)–(2.6)

определяем значения тока  $I_{\text{с.макс}}$ , и по выражению (2.2) значение скорости

$$I_2'(s_{T.2}) = \frac{U_{1\text{фн}}}{\pm \sqrt{\left( R_1 + \frac{R_2'}{s_{T.2}} \right)^2 + X_{\text{кн}}^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{T.2} \cdot X_{\mu}} \right)^2}} =$$

$$I_{\text{с.макс}} = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s_{T.2}) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s_{T.2}) \cdot \sin \varphi_2(s_{T.2})} = \sqrt{21,835^2 + 39,6^2 + 2 \cdot 21,835 \cdot 39,6 \cdot 0,156} = 48,12 \text{ A},$$





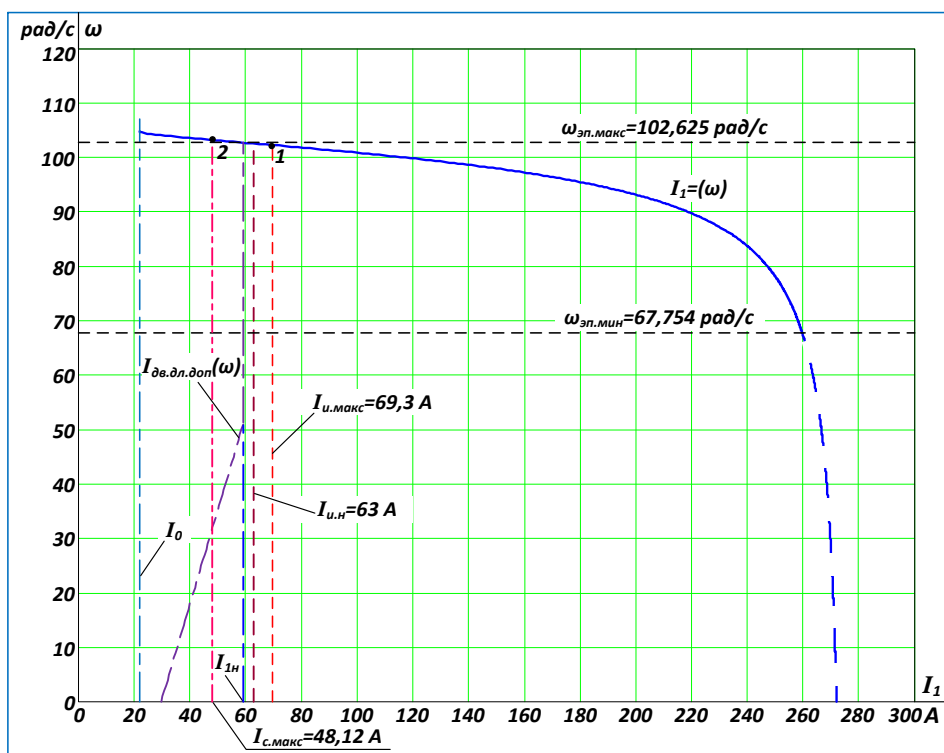


Рисунок 2.7 – Электромеханические характеристики электропривода  $\omega(I_1)$  и нагрузки при векторном управлении

### ***Проверка правильности выбора двигателя***

Анализ приведенных на рисунке 2.6 механических характеристик электропривода  $\omega(M)$  и нагрузки  $M(\omega)$  (рисунок 2.6) показывает, что во всем диапазоне регулирования скорости выполняются условия:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) &\geq M_{\text{с.макс}} \\ M_{\text{дв.макс}}(\omega) &\geq M_{\text{эп.макс}} \end{aligned} \right\},$$

следовательно, двигатель по моменту выбран правильно.

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода  $\omega(I_1)$  (рисунок 2.7) во всем диапазоне регулирования скорости имеем:

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) \geq I_{\text{с.макс}}$$

Во всем диапазоне регулирования скорости, что подтверждает правильность выбора двигателя по току.

### ***Проверка правильности выбора преобразователя***

На рисунке 2.7 в плоскости электромеханических характеристик построены характеристики, соответствующие номинальному и максимально допустимому току преобразователя:

$$I_{\text{и.н}} = 63 \text{ А},$$

$$I_{\text{и.макс}} = 69,3 \text{ А}.$$

Анализ приведенных на рисунке 2.7, показывает, что  $I_{\text{и.н}} \geq I_{\text{с.макс}}$ , следовательно преобразователь по току выбран правильно.

### ***Обеспечение адекватности модели электродвигателя [17]***

Оценим адекватность параметров модели и справочных и полученных расчетных параметров электродвигателя. Параметры двигателя, соответствующие справочным данным:  $I_{\text{дв.н}} = I_{1\text{ф.н}}; M_{\text{дв.н}}$ . Параметры двигателя расчетные:  $I_0; I_1(s_{\text{н}}); M_{\text{эм.н}}$  и  $\psi_{2\text{н}}$ . За основные параметры электродвигателя примем значения номинального тока  $I_{1\text{фн}}$  и номинального электромагнитного момента  $M_{\text{эм.н}}$ . Решив совместно систему уравнений

$$\psi_{2\text{н}} = \frac{M_{\text{эм.н}}}{\frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\text{фн}}^2 - I_0^2}},$$

$$\psi_{2\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m$$

относительно тока  $I_0$ , определим значение тока намагничивания  $I_0^*$ , соответствующее параметрам структурной схемы.

Найденное значение  $I_0^* = 21,034 \text{ А}$  несущественно отличается от значения расчетного тока намагничивания  $I_0 = 21,835 \text{ А}$ .

Рассчитаем параметры структурной схемы, необходимые для оптимизации контуров регулирования:

Значение номинального потокосцепления

$$\psi_{2dн}^* = \psi_{2н}^* = \sqrt{2} \cdot I_0^* \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 21,034 \cdot 0,031 = 0,92 \text{ Вб};$$

Значение номинального тока  $I_{1d}^*$

$$I_{1dн}^* = \sqrt{2} \cdot I_0^* = \sqrt{2} \cdot 21,034 = 29,747 \text{ А};$$

Значение номинального тока  $I_{1q}^*$

$$I_{1qн}^* = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\left(I_{1фн}\right)^2 - \left(I_0^*\right)^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{59,334^2 - 21,034^2} = 78,461 \text{ А};$$

Максимально допустимое значение тока  $I_{1d}^*$

$$I_{1d\text{ макс}}^* = \sqrt{2} \cdot I_{\text{эп.макс}}^* = \sqrt{2} \cdot 69,3 = 98 \text{ А}$$

Максимально допустимое значение тока  $I_{1q}^*$

$$I_{1q\text{ макс}}^* = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\left(I_{\text{эп.макс}}^*\right)^2 - \left(I_0^*\right)^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{69,3^2 - 21,034^2} = 95,718 \text{ А},$$

где  $I_{\text{эп.макс}}^* = I_{\text{и.макс}} = 69,3 \text{ А}$

## **2.8. Расчет статических характеристик разомкнутой системы преобразователь частоты -асинхронный двигатель при частотном управлении**

Механическая характеристика разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель в статическом режиме рассчитана при номинальной частоте  $f_{1н}$ , постоянном потокосцеплении ротора  $\Psi_{2d} = \Psi_{2н}$  и

разомкнутой системе регулирования составляющей напряжения двигателя  $U_{1q}$  по выражению

$$\omega(M) = \omega_0(f_{1H}) - \Delta\omega(M) = \frac{2\pi \cdot f_{1H}}{z_p} - \frac{M}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m^2}{L_2'^2} \cdot z_p^2 \cdot \frac{1}{R_{1\varnothing}} \cdot \Psi_{2H}^2},$$

$$= \frac{2\pi \cdot 50}{3} - \frac{M}{\frac{3}{2} \cdot \frac{0,031^2}{0,032^2} \cdot 3^2 \cdot \frac{1}{0,168} \cdot 0,92^2}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

и построена в плоскости механической характеристики  $\omega(M_{\text{эм}})$  двигателя.

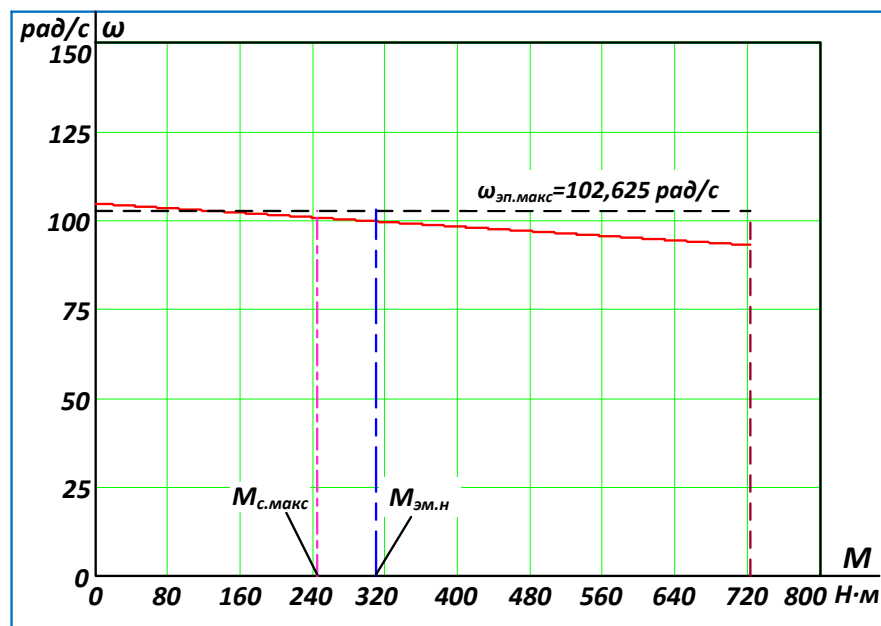


Рисунок 2.8 – Статическая механическая характеристика разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель

Электромеханическая характеристика разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель в статическом режиме рассчитана при номинальной частоте  $f_{1H}$ , постоянном потокоцеплении ротора  $\Psi_{2d} = \Psi_{2H}$  и разомкнутой системе регулирования составляющей напряжения двигателя  $U_{1q}$  по выражению

$$\omega(I_{1\phi}) = \frac{2\pi \cdot f_{1H}}{z_p} - \frac{\sqrt{2 \cdot I_{1\phi}^2 - \left(\frac{\Psi_{2H}}{L_m}\right)^2}}{\frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot \frac{1}{R_{1\phi}} \cdot \Psi_{2H}} =$$

$$= \frac{2\pi \cdot 50}{3} - \frac{\sqrt{2 \cdot I_{1\phi}^2 - \left(\frac{0,92}{0,031}\right)^2}}{\frac{0,031}{0,0325} \cdot 3 \cdot \frac{1}{0,168} \cdot 0,92}, \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

где  $I_{1\phi} \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\Psi_{2H}}{L_m},$

и построена в плоскости электромеханической характеристики  $\omega(I_1)$  двигателя.

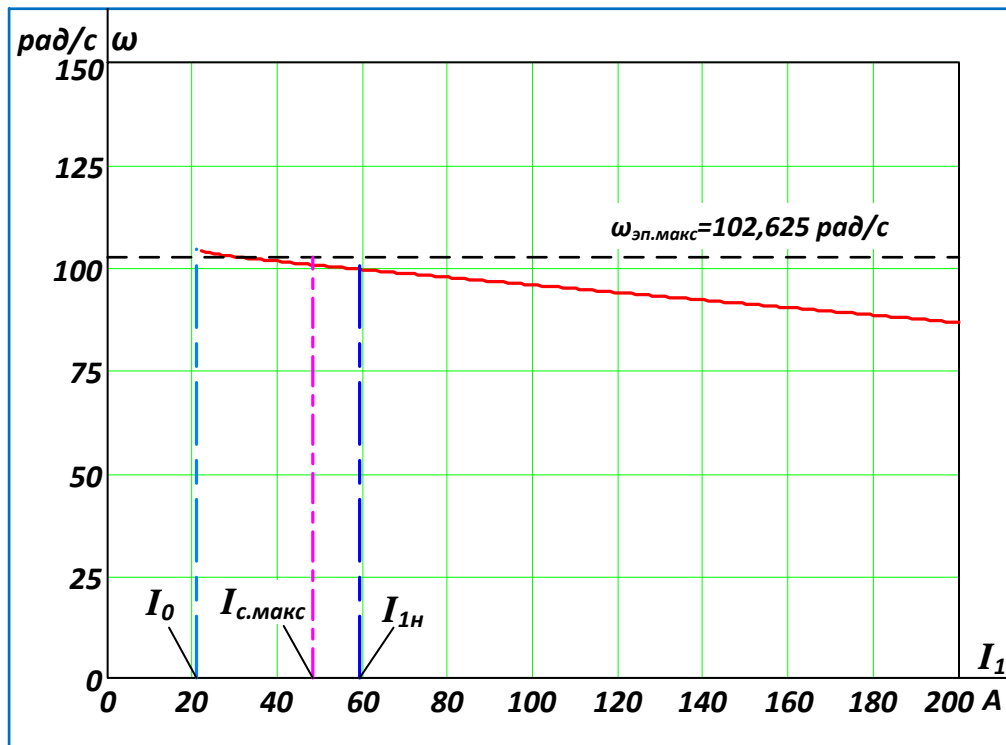


Рисунок 2.9 – Статическая электромеханическая характеристика разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель

**Выбор напряжения питающей сети асинхронного электропривода с частотным векторным управлением**

Поскольку жесткость статических характеристик разомкнутой системы преобразователь – двигатель оказывается меньше жесткости естественных характеристик двигателя, то, очевидно, что необходимо иметь некоторый запас по напряжению питающей сети для обеспечения требуемой максимальной рабочей скорости электропривода и его быстродействия.

Напряжение питающей сети выбираем из следующего условия:

– при скорости двигателя  $\omega^* = \omega_{\text{эл.макс}}$  преобразователь должен обеспечивать ток  $I_{1\phi}^* \geq I_{\text{с макс}}$  (максимальное быстродействие электропривода достигается при выполнении условия  $I_{1\phi}^* \geq I_{1\phi \text{ макс}}$ ).

При выбранных значениях максимальной скорости  $\omega^*$  и тока  $I_{1\phi}^*$  рассчитаны требуемые значения:

– составляющей тока  $I_{1q}$  двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат  $d, q$

$$I_{1q}^* = \sqrt{2} \cdot \sqrt{(I_{1\phi}^*)^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{48,118^2 - 21,034^2} = 61,202 \text{ А};$$

– частоты питающего напряжения

$$\begin{aligned} f_1^* &= \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \omega^* \cdot z_p + R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot \frac{I_{1q}^*}{\Psi_{2н}} \right) = \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot \left( 102,625 \cdot 3 + 0,082 \cdot \frac{0,031}{0,0325} \cdot \frac{61,202}{0,92} \right) = 49,652 \text{ Гц}; \end{aligned}$$

– составляющей напряжения  $U_{1d}$  двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат  $d, q$

$$\begin{aligned} U_{1d}^* &= \left( \frac{R_{1э}}{L_m} - R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'^2} \right) \cdot \Psi_{2н} - 2\pi \cdot f_1^* \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}^* = \\ &= \left( \frac{0,168}{0,031} - 0,082 \cdot \frac{0,031}{0,0325^2} \right) \cdot 0,92 - 2\pi \cdot 49,652 \cdot 0,082 \cdot 0,032 \cdot 61,202 = -47,231 \text{ В}; \end{aligned}$$

– составляющей напряжения  $U_{1q}$  двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат  $d, q$

$$\begin{aligned}
U_{1q}^* &= 2\pi \cdot f_1^* \cdot \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \cdot \Psi_{2H} + \frac{L_m}{L_2'} \cdot \Psi_{2H} \cdot z_p \cdot \omega^* + R_{1\phi} \cdot I_{1q}^* = \\
&= 2\pi \cdot 49,652 \cdot \frac{0,082 \cdot 0,032}{0,031} \cdot 0,092 + \frac{0,031}{0,0325} \cdot 0,092 \cdot 3 \cdot 102,625 + 0,168 \cdot 61,202 = \\
&= 304,299 \text{ В};
\end{aligned}$$

– фазного напряжения трехфазного двигателя

$$U_{1\phi}^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(U_{1d}^*)^2 + (U_{1q}^*)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(-47,231)^2 + (304,299)^2} = 217,748$$

В;

– напряжения звена постоянного тока преобразователя

$$U_d^* = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\phi}^* = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 217,748 = 533,372 \text{ В};$$

– напряжения питающей сети

$$U_c^* = \frac{U_d^*}{1.35} = \frac{533,372}{1.35} = 395 \text{ В}.$$

### ***Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода***

Расчет параметров преобразователя

В простейшем случае без учета ШИМ инвертор представляет собой линейный усилитель с чистым запаздыванием на величину периода широтно-импульсной модуляции  $T_{\text{ШИМ}}$

$$T_{\text{и}} = T_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}} = \frac{1}{10000} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с},$$

где  $f_{\text{ШИМ}} = 10000$  Гц – несущая частота инвертора (частота ШИМ).

Максимальные значения действующего и амплитудного фазного напряжения двигателя принимаем, соответственно, равными:

$$U_{1\phi H} = 220 \text{ В}; U_{1\phi m} = \sqrt{2} \cdot U_{1\phi H} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,1 \text{ В}.$$

С учетом ШИМ напряжения инвертора и при соединении обмоток статора двигателя в звезду условие согласования напряжения преобразователя и двигателя

$$U_{d0} \geq \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1H}}{\gamma_{\max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 220}{0,95} = 567,25 \text{ В},$$

где  $\gamma_{\max} < 1$  – максимальное значение коэффициента относительной продолжительности включения ключей инвертора, примем  $\gamma_{\max} = 0,95$  о.е.,

тогда требуемое значение линейного напряжения источника питания преобразователя

$$U_c = \frac{U_{d0}}{1,35} = \frac{567,25}{1,35 \div 1,41} = 401 \div 420 \text{ В};$$

Принимаем коэффициент усиления инвертора

$$k_{\text{и}} = \frac{U_{\text{д}}^*}{\sqrt{3}} = \frac{533,372}{\sqrt{3}} = 307,943.$$

### **3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА САУ ЭП И НАСТРОЙКА КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

#### **3.1. Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением**



Структурная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода приемника с векторным управлением приведена на рисунке 3.1. Электропривод реализован по схеме с независимым управлением потокосцеплением.

На схеме рисунок 3.1 приняты следующие обозначения:

$W(p)_{\text{рт}}, W(p)_{\text{р}\Psi}, W(p)_{\text{рс}}$  – передаточные функции регуляторов тока, потокосцепления и скорости;

$k_{\text{т}}$  – коэффициент обратной связи по току,  $1/\text{А}$ ;

$k_{\Psi}$  – коэффициент обратной связи по потокосцеплению ротора,  $1/\text{Вб}$ ;

$k_{\text{с}}$  – коэффициент обратной связи по скорости,  $1/\text{рад/с}$ .

$T_{\text{мто}}, T_{\text{м}\Psi\text{о}}$  и  $T_{\text{мсо}}$  – малые постоянные времени цепи обратной связи по току, потокосцеплению и скорости, с

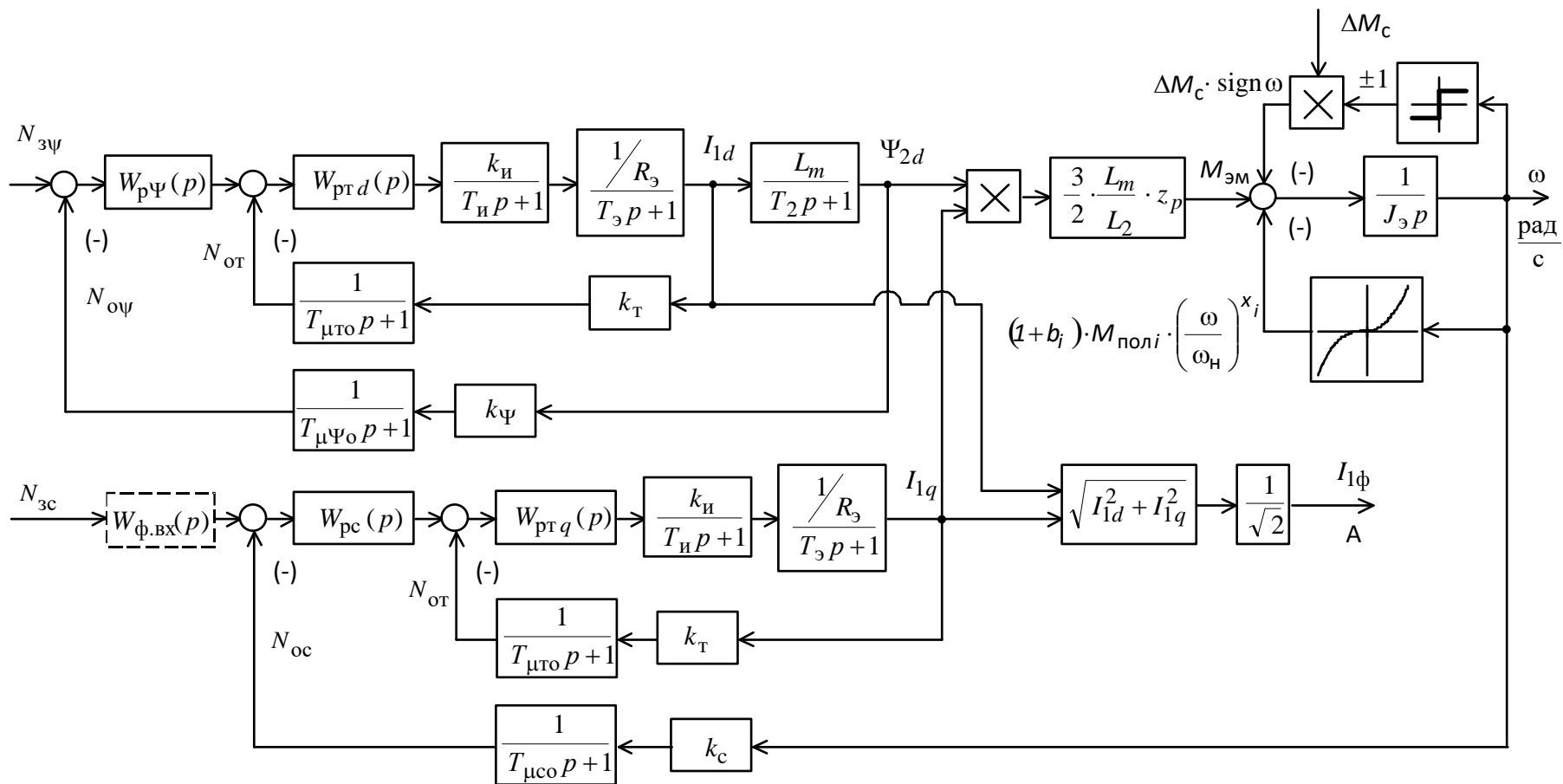


Рисунок 3.1 – Структурная схема линейризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

### 3.2 Структурная схема нелинейной САУ регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении приведена на рисунке 3.2. Учтены следующие основные нелинейности элементов системы управления электропривода, двигателя и нагрузки:

постоянное ограничение выходного сигнала регуляторов тока, в общем случае равно

$$N_{\text{рт.макс}} = N_{\text{уп.макс}};$$

– постоянное ограничение выходного сигнала регулятора потокосцепления, в общем случае равно

$$N_{\text{р}\Psi \text{ макс}} = k_T \cdot I_{1d \text{ макс}}^*;$$

– постоянное ограничение выходного сигнала регулятора скорости, в общем случае равно

$$N_{\text{рс.макс}} = k_T \cdot I_{1q \text{ макс}}^*$$

при постоянном значении допустимого максимального тока электропривода.

– ограничение выходного напряжения инвертора на уровне

$$E_{\text{и.макс}} = \sqrt{2} \cdot U_{1\text{фн}}, \text{ В};$$

– внутренние перекрестные обратные связи асинхронного двигателя;

– реактивный вентиляторный характер нагрузки

$$M_{\text{с}}(\omega) = M_{\text{с}} \cdot \text{sign } \omega, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

где величина момента  $M_{\text{с}}$  изменяется от  $(M_{\text{с.вент.мин}} + \Delta M_{\text{с.дв}})$  до

$(M_{\text{с.вент.макс}} + \Delta M_{\text{с.дв}})$ ;

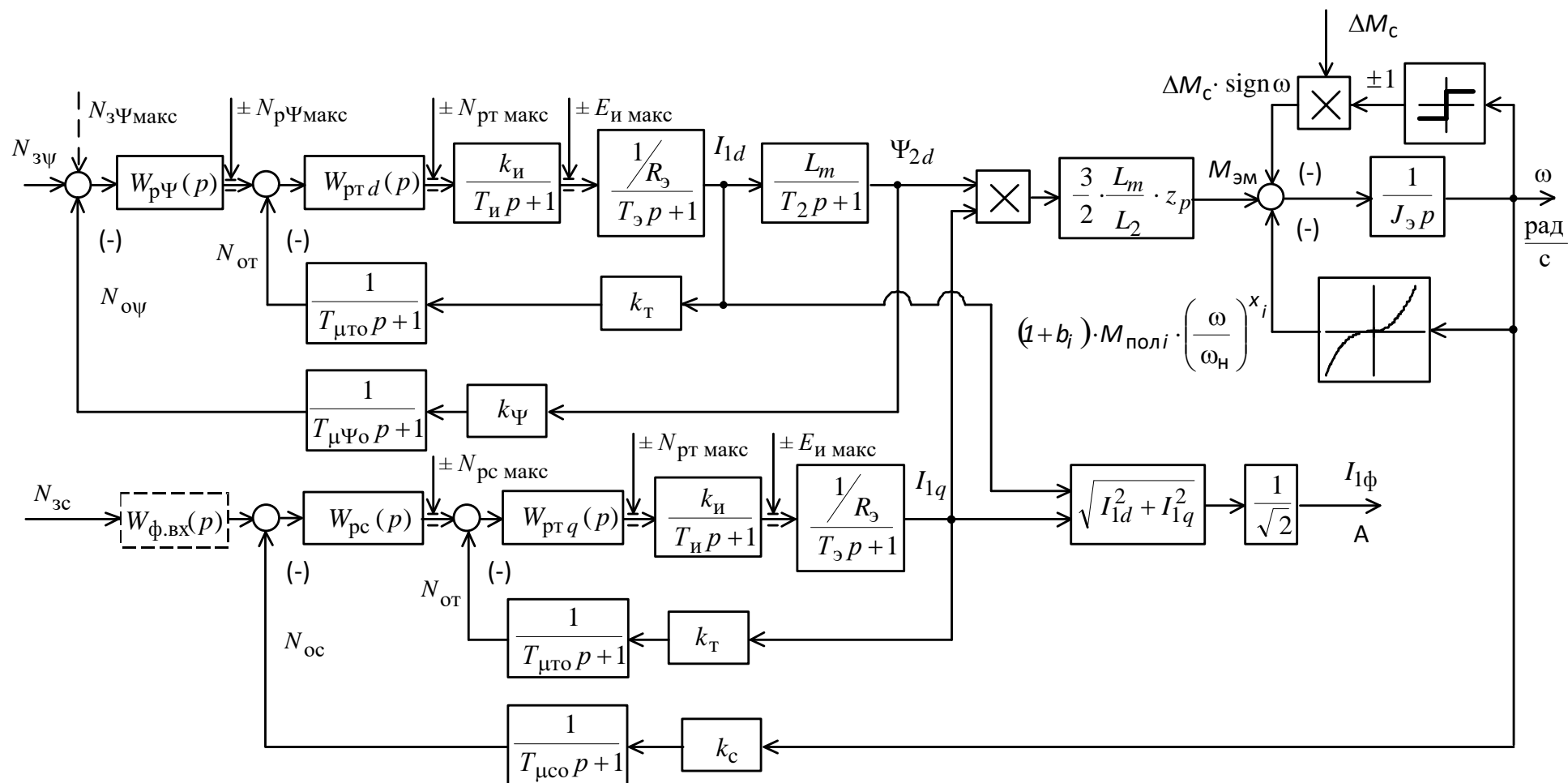


Рисунок 3.2– Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

### 3.3 Оптимизация контуров регулирования САУ электропривода с учетом квантования сигналов

#### *Учет квантования по уровню сигналов в контуре тока*

АЦП в цепи обратной связи по току устанавливается для преобразования аналогового сигнала с датчика тока в цифровой сигнал обратной связи по току на вход программно реализуемого цифрового регулятора тока.

Разрядность АЦП в составе датчика тока  $n_{\text{ацп.дт}}$  с учетом допустимого перерегулирования тока  $\sigma \leq 10\%$  должна удовлетворять условию

$$2^{n_{\text{ацп.дт}}} > \frac{1.1 \cdot \sqrt{I_{1q\text{ макс}}^{*2} + I_{1d\text{ н}}^{*2}}}{0.5 \cdot I_{1d\text{ мин}} \cdot \Delta_T} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{95.718^2 + 29.747^2}}{0.5 \cdot 29.747 \cdot 0.03} = 241.6,$$

где

$$I_{1d\text{ мин}} = I_{1d\text{ н}}^* = \frac{\psi^* 2d_{\text{н}}}{L_{\text{м}}} = 29.747 \text{ А}$$

$\Delta_T < 0.05$  – погрешность измерения тока, определяемая квантованием сигнала по уровню, о.е. Выбираем  $\Delta_T = 0.03$

Разрядность АЦП принято  $n_{\text{ацп.дт}} = 12$ .

Имитационные модели контуров регулирования, учитывающие квантование сигналов обратной связи по уровню и времени и сигналов управления по времени, приведены на рис.3.3 и 3.4.

### **3.3.1. Оптимизация контура тока с ПИ-регулятором, аналоговым датчиком тока и учетом квантования сигналов в контуре**

Контур токов  $I_{1d}$  и  $I_{1q}$  реализованы по одной схеме и имеют одинаковые параметры (рис.3.3 и 3.4). Аналоговые сигналы с первичных преобразователей тока двух фаз обмотки статора преобразуются с помощью АЦП в цифровые сигналы. В цепи измерения токов могут быть установлены аналоговые сглаживающие фильтры.

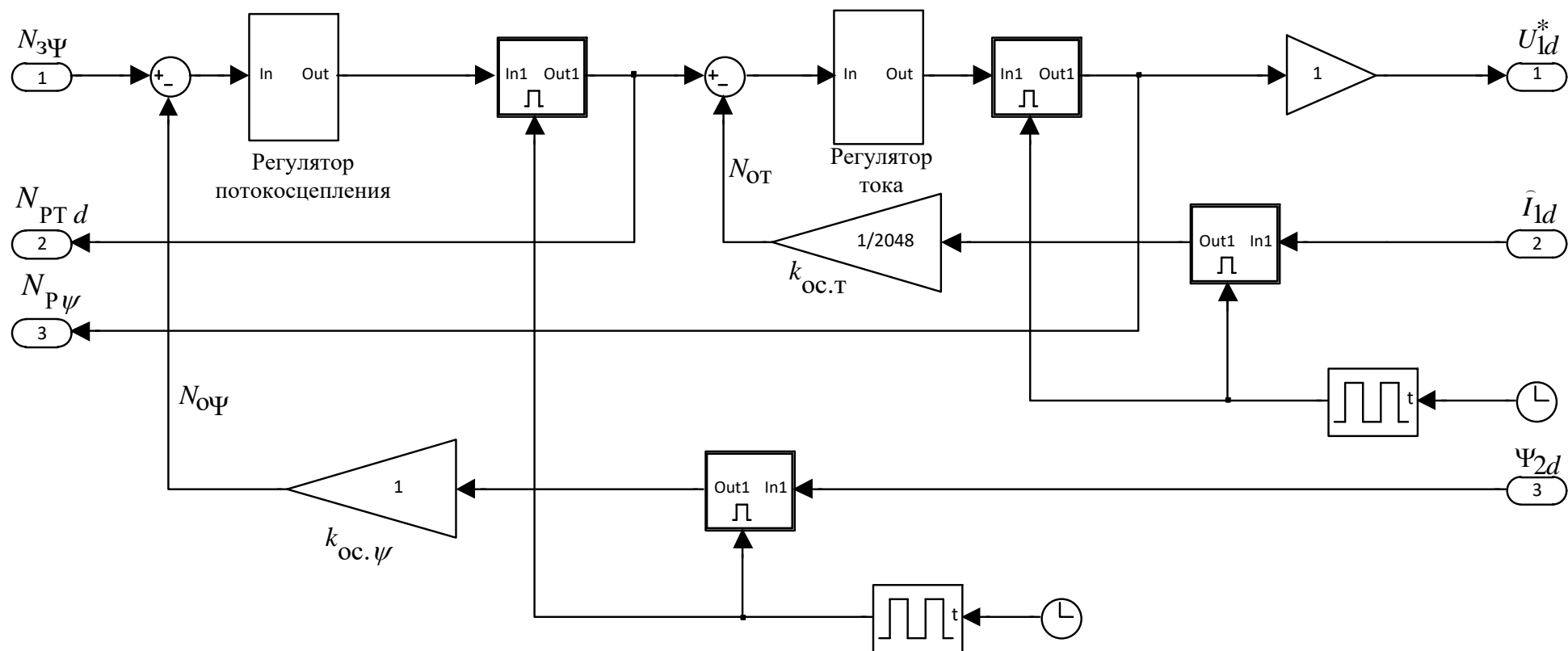
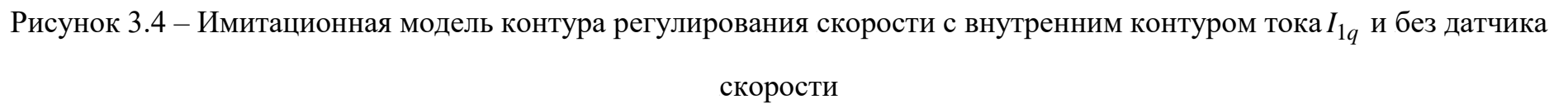


Рисунок 3.3 – Имитационная модель контура регулирования потокосцепления ротора  $\Psi_{2d}$  с внутренним контуром тока

$I_{1d}$





## **Параметры элементов контура тока**

Коэффициент передачи датчика тока

$$k_{\text{ДТ}} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{\text{АЦП.ДТ}}}}{\sigma_{\text{Т}} \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}})} = \frac{0,5 \cdot 4096}{1,2 \cdot (\sqrt{2} \cdot 69,3)} = 17,414 \text{ 1/А},$$

где  $\sigma_{\text{Т}}$  – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока, принято  $\sigma_{\text{Т}} = 1,2$ ;

$n_{\text{АЦП. ДТ}}$  – разрядность АЦП датчика тока преобразователя;

Интервал квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока

$$T_{\text{ос.т}} = n_{\text{ос.т}} \cdot T_{\text{шим}} = 1 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с},$$

где  $n_{\text{ос.т}} \geq 1$  – количество периодов модуляции для измерения тока, при частоте, принято  $n_{\text{ос.т}} = 1$ ;

$T_{\text{ПК.т}} \leq T_{\text{ос.т}}$  – интервал квантования управления в прямом канале контура тока, с;

$T_{\text{зу.и}} = T_{\text{шим}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$  – интервал времени задержки подачи управления от регулятора тока к ключам инвертора;

$T_{\text{ф.от}}$  – постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения тока,  $T_{\text{ф.от}} = 0$  т.к. фильтр отсутствует;

$N_{\text{зт.макс}}$  – максимальное значение задания на входе контура тока, соответствующее максимальному значению тока электропривода  $I_{\text{ЭП.макс}}$ , в

относительных единицах  $N_{\text{зт.макс}} = \frac{1}{\sigma_{\text{Т}}}$

**Расчетные параметры настройки и показатели качества работы контура тока**

Передаточная функция ПИ-регулятора тока

$$W(p)_{\text{PT}} = k_{\text{PT}} \cdot \frac{T_{\text{PT}} \cdot p + 1}{T_{\text{PT}} \cdot p}.$$

Параметры настройки регулятора:

– постоянная времени регулятора тока

$$T_{\text{PT}} = T_{1\text{Э}} = 0,016 \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{PT}} = \frac{T_{1\text{Э}} \cdot R_{1\text{Э}}}{k_{\text{И}} \cdot k_{\text{T}} \cdot a_{\text{T}} \cdot T_{\mu\text{ТЭ}}} = \frac{0,016 \cdot 0,168}{307,943 \cdot 0,0085 \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}} = 3,334,$$

где

$$k_{\text{T}} = \frac{N_{\text{ЗТ.макс}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}}} = \frac{1}{\sigma_{\text{T}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭП.макс}}} = \frac{1}{1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 69,3} = 0,0085 \text{ 1/А},$$

– коэффициент обратной связи по току;

$$T_{\mu\text{ТЭ}} = \frac{T_{\text{ос.т}}}{n_{\text{T}}} + T_{\text{зу.и}} + T_{\text{ф.от}} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{2} + 1 \cdot 10^{-4} + 0 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура тока;

$n_{\text{T}} = 1 \div 3$  – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном, принят  $n_{\text{T}} = 2$  – настройка контура тока близка к типовой настройке на МО ( $\sigma < 5\%$ );

$a_{\text{T}} = 2$  – коэффициент типовой настройки контура тока на модульный оптимум (МО).

Достигнуто максимальное быстродействие контура тока, т.к.  
 $T_{\text{ос.т}} = T_{\text{ПК.т}} = T_{\text{шим}}.$

Показатели качества работы по управлению контура тока с инерционной обратной связью (без дополнительного фильтра на входе контура) при выборе  $a_T = 2$  и  $n_T = 2$ :

– статическая ошибка по управлению

$$\Delta I_{y.ст} = 0;$$

– полоса пропускания

$$\omega_{п.кт} = \frac{0,71}{T_{\mu TЭ}} = \frac{0,71}{1,5 \cdot 10^{-4}} = 4733,3 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

– перерегулирование и время первого вхождения в 5%-ю зону при отработке ступенчатого управляющего воздействия:

$$\sigma = 4.3 \% , t_{py1}^{(5)} = t_{py2}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{\mu TЭ} = 4.1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 6.15 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Для ограничения управления инвертором на заданном уровне  $\gamma_{\text{макс}}$  значения выходных сигналов регуляторов токов  $I_{1d}$  и  $I_{1q}$  должны удовлетворять условию

$$\gamma_{\text{макс}}^2 = N_{\text{рtd}}^2 + N_{\text{ртq}}^2.$$

В качестве приоритетного выбрано текущее значение выходного сигнала регулятора  $I_{1d}$ , тогда допустимое значение его выходного сигнала ограничивается на постоянном уровне

$$N_{\text{рtd доп}} = \gamma_{\text{макс}} = 0,95,$$

а допустимое значение выходного сигнала регулятора тока  $I_{1q}$  в процессе работы ограничено в соответствии с условием

$$N_{\text{ртq доп}} = \sqrt{\gamma_{\text{макс}}^2 - N_{\text{рtd}}^2}.$$

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе контура тока

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{k_T}{k_{\text{дт}}} = \frac{8,503 \cdot 10^{-3}}{17,414} = 4,883 \cdot 10^{-4}.$$

### 3.3.2. Оптимизация контура скорости с ПИ-регулятором и без датчика скорости

Структурная схема линейризованного контура скорости с ПИ-регулятором приведена на рисунке 3.5.

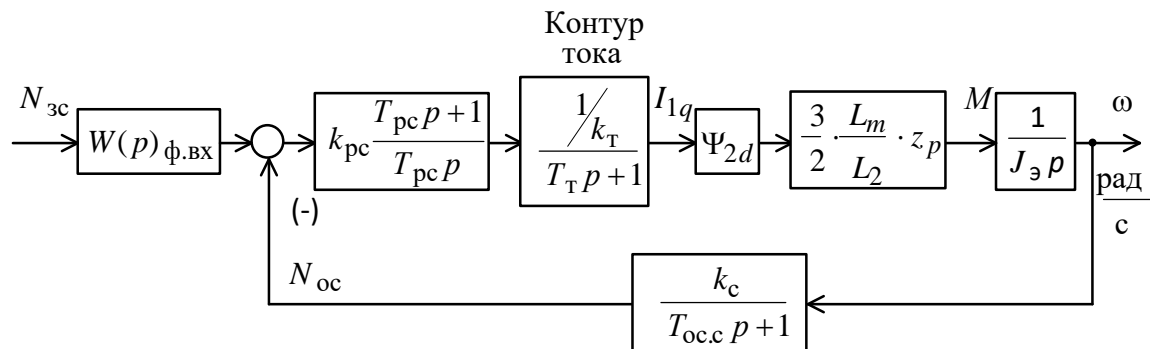


Рисунок 3.5 – Структурная схема линейризованного контура скорости с ПИ-регулятором

Внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{т.зам}} \approx \frac{1}{\frac{k_T}{T_T \cdot p + 1}},$$

где

$T_T = a_T \cdot T_{\mu\Gamma\Theta} = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-4}$  с – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

**Параметры элементов контура скорости в электроприводе без датчика скорости**

$k_{\text{дс}} = 1$  – коэффициент передачи датчика скорости, с/рад,

$\sigma_c$  – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование скорости, принято  $\sigma_c = 1,5$ ;

$T_{ос.с} = n_{ос.с} \cdot T_{шим} = 10 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-3}$  с – интервал квантования по времени сигналов в цепи обратной связи контура скорости, где  $n_{ос.с} \geq 1$  целое число, принято  $n_{ос.с} = 10$ ;

$T_{пк.с} \leq T_{ос.с}$  – интервал квантования управления в прямом канале контура скорости, с;

$T_{ф.ос}$  – постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения скорости,  $T_{ф.от} = 0$  с, т.к. фильтр отсутствует;

$N_{зс.макс}$  – максимальное значение задания на входе контура скорости, соответствующее значению максимальной скорости привода  $n_{эп.макс}$ , в относительных единицах  $N_{зс.макс} = \frac{1}{\sigma_c}$ .

### ***Расчетные параметры настройки контура скорости в электроприводе без датчика скорости***

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости:

$$W(p)_{pc} = k_{pc} \cdot \frac{T_{pc}p + 1}{T_{pc} \cdot p}.$$

Параметры настройки регулятора скорости:

– постоянная времени регулятора

$$T_{pc} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c\epsilon} = 2 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора

$$k_{pc} = \frac{J_{\epsilon} \cdot k_T}{c_M \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c\epsilon}} = \frac{2,86 \cdot 0,0085}{3,942 \cdot 0,0065 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = 593,49,$$

где

$$c_M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \Psi_{2H} \cdot z_p = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,031}{0,032} \cdot 0,92 \cdot 3 = 3,942 \text{ Н·м/А} - \text{коэффициент}$$

электромагнитного момента двигателя при номинальном значении потокоцепления ротора;

$$k_c = \frac{N_{3c.\text{макс}}}{\omega_{\text{ЭП.макс}}} = \frac{1}{\sigma_c \cdot \omega_{\text{ЭП.макс}}} = \frac{1}{1,5 \cdot 102,625} = 0,0065 \text{ с/рад}$$

– коэффициент обратной связи по скорости;

$$T_{\mu c} = T_T + \frac{T_{oc.c}}{n_c} + T_{ф.oc} = 3 \cdot 10^{-4} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2} + 0 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости;

$n_c = 1 \div 3$  – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном, принят  $n_c = 2$  – настройка контура близка к настройке на СО;

$b_c = a_c = 2$  – коэффициенты типовой настройки контура скорости на симметричный оптимум (СО) с ПИ-регулятором.

Ограничение перерегулирования в контуре скорости с ПИ-регулятором достигается установкой на входе контура инерционного фильтра (рисунок 3.5) с постоянной времени

$$T_{ф.вх} = T_{pc} \div (T_{pc} + \frac{T_{oc.c}}{n_c} + T_{ф.oc}) = 3,2 \cdot 10^{-3} \div 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Установка на входе контура скорости инерционного фильтра одновременно с уменьшением перерегулирования уменьшает и быстродействие контура.

Для ограничения тока двигателя на заданном уровне  $I_{1\text{макс}}$  значения выходных сигналов регуляторов потокоцепления и скорости в общем случае должны удовлетворять условию

$$N_{3т.\text{макс}}^2 = N_{p\Psi}^2 + N_{pc}^2.$$

В качестве приоритетного выбрано текущее значение выходного сигнала регулятора потокосцепления, тогда допустимое значение выходного сигнала регулятора скорости в процессе работы должно поддерживаться в соответствии с условием

$$N_{\text{рс. доп}} = \sqrt{N_{\text{зт. макс}}^2 - N_{\text{р}\Psi}^2}.$$

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе контура скорости

$$k_{\text{ос.с}} = k_{\text{с}}.$$

Допустимое значение сигнала управления на входе контура скорости

$$N_{\text{зс. доп}} = k_{\text{с}} \cdot \omega_{\text{эп. макс}} = 0,0065 \cdot 102,625 = 0,667.$$

В электроприводе без датчиков потока и скорости, оказалось невозможным обеспечить предельное быстродействие электропривода и его пришлось ограничить, задавшись значением минимальной допустимой полосы пропускания  $f_{\text{рэп}} = 30$  Гц.

### ***Определение полосы пропускания электропривода***

Для настройки контура на выбранную полосу пропускания  $f_{\text{рэп}} = 30$  Гц параметры настройки ПИ-регулятора выбираем из следующих условий:

$$T_{\text{рс2}} = \frac{2,82}{\omega_{\text{рэп}}} = \frac{2,82}{157,08} = 0,015 \text{ с},$$

где  $\omega_{\text{рэп}} = 2\pi f_{\text{рэп}} = 2\pi \cdot 30 = 157,08$  рад/с;

$$k_{\text{рс2}} = \frac{2 \cdot J_{\text{э}} \cdot k_{\text{т}}}{\Psi_{2d} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot k_{\text{с}} \cdot T_{\text{рс2}}} = \frac{2 \cdot 2,86 \cdot 0,0085}{0,92 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,031}{0,0325} \cdot 3 \cdot 0,0065 \cdot 0,015} = 126,91,$$

При полосе пропускания  $f_{\text{рэп}} = 30$  Гц коэффициент усиления регулятора уменьшиться в

$$\frac{k_{\text{рс}}}{k_{\text{рс2}}} = \frac{593,49}{157,08} \approx 4,6 \text{ раз},$$

а постоянная времени регулятора увеличится в  $\frac{T_{pc2}}{T_{pc}} = \frac{0,015}{3,2 \cdot 10^{-3}} \approx 4,6$  раз.

Полоса пропускания определяется при достижении системой следующих параметров:

– амплитуда выходного сигнала в 0.707 раз меньше амплитуды входного сигнала

– отставание по фазе выходного сигнала от входного составляет  $90^\circ$ .

График переходного процесса отработки гармонического задания  $N_{3c}(t) = (0,667 \cdot 0,005) \sin 2\pi 25$  представлен на рисунке 3.6.

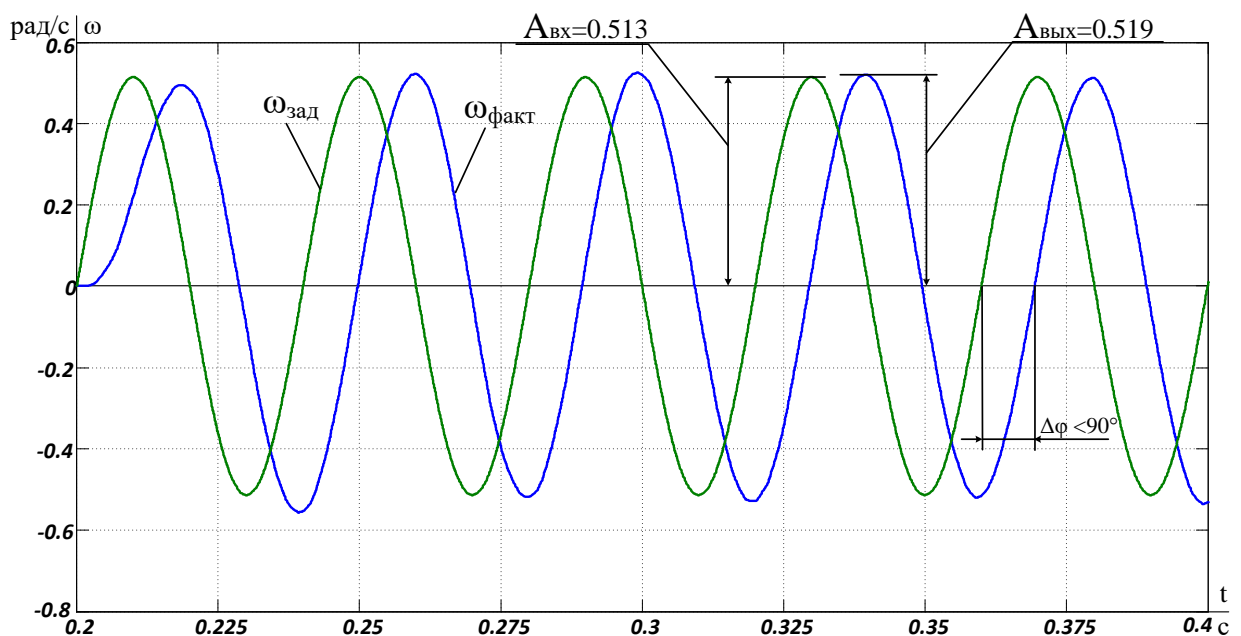


Рисунок 3.6 – Диаграмма заданной и фактической скорости  $\omega = f(t)$  при частоте входного сигнала 25 Гц.

Электропривод обрабатывает частоту входного сигнала  $f_{р\pi} = 25$  Гц

Графики переходного процесса при отработке ступенчатых заданий  $N_{3c}(t) = (0,667 \cdot 0,005)$  и  $N_{3c}(t) = (0,667 \cdot 0,05)$  представлены на рисунке 3.7а и 3.7б соответственно.



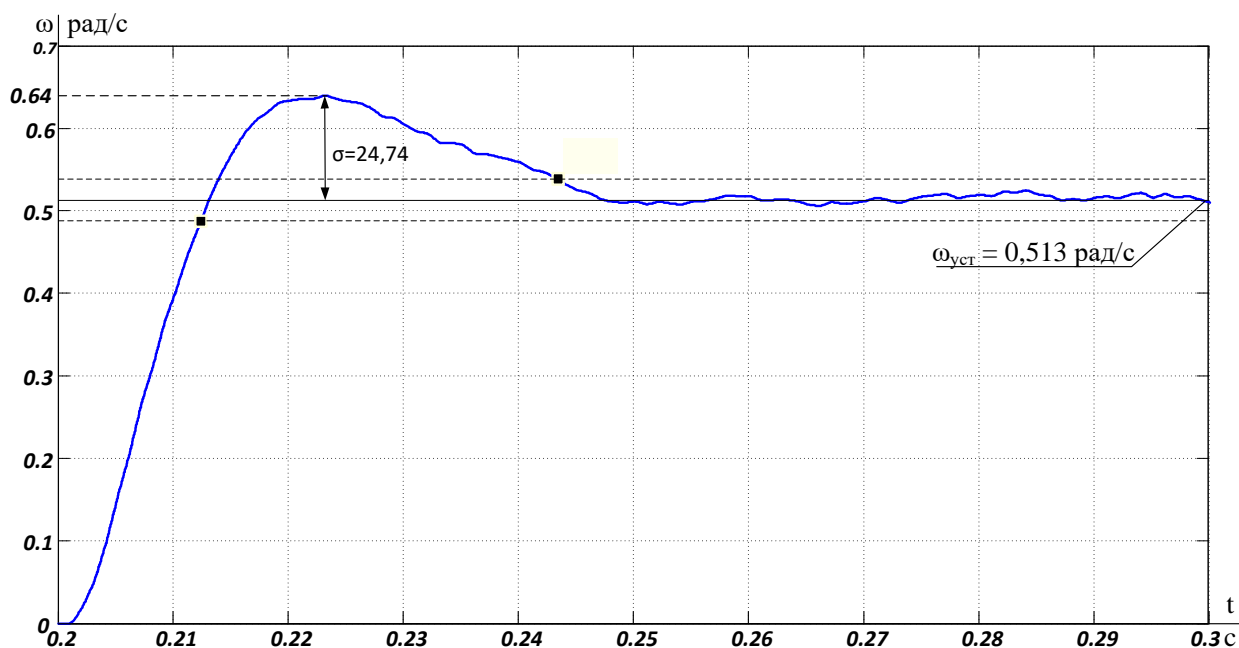


Рисунок 3.7а – Переходный процесс в контуре скорости при обработке ступенчатого задания при диапазоне регулирования  $D = 1:200$ .

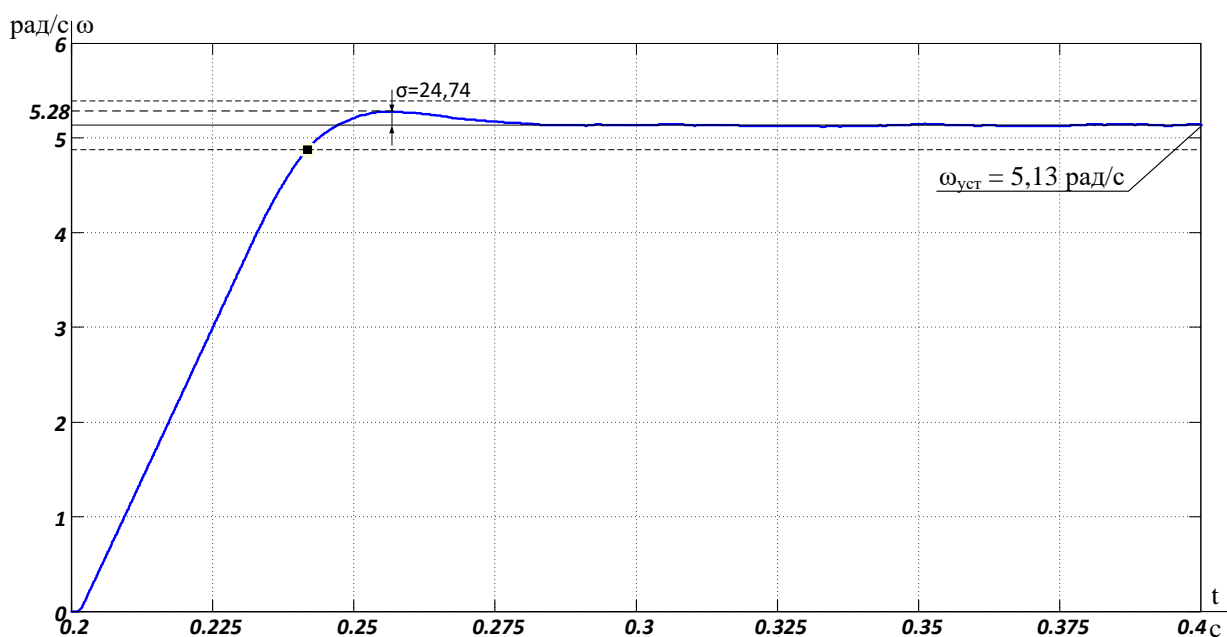


Рисунок 3.7б – Переходный процесс в контуре скорости при обработке ступенчатого задания при диапазоне регулирования  $D = 1:20$ .

Контур скорости при обработке ступенчатых управляющих воздействий при ступенчатом задании скорости  $N_{3c}(t) = (0,667 \cdot 0,005)$  имеет перерегулирование 24,74 %, при большем задании  $N_{3c}(t) = (0,667 \cdot 0,05)$  перерегулирование уменьшается и составляет меньше 5%.

### 3.3.3. Оптимизация контура потокосцепления ротора с ПИ-регулятором без датчика потока

Имитационная модель контура потокосцепления без датчика потока приведена на рис. 3.3.

Внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{Т.зам}} \approx \frac{1}{T_{\text{Т}} \cdot p + 1},$$

где

$T_{\text{Т}} = a_{\text{Т}} \cdot T_{\mu\text{ГЭ}} = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-4}$  с – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

#### *Параметры элементов контура потокосцепления без датчика потока*

$k_{\text{д}\Psi} = 1 \frac{1}{B\delta}$  – коэффициент передачи датчика потока;

$\sigma_{\Psi}$  – коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование потока, выбрано  $\sigma_{\Psi} = 1,2$ ;

$T_{\text{ос.}\Psi} = n_{\text{ос.}\Psi} \cdot T_{\text{шим}} = 10 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 1 \cdot 10^{-3}$  с – интервал квантования по времени сигналов в цепи обратной связи контура потокосцепления,

где  $n_{\text{ос.}\Psi} \geq 1$  целое число, выбрано  $n_{\text{ос.}\Psi} = n_{\text{ос.с}} = 10$ ;

$T_{\text{пк.}\Psi} \leq T_{\text{ос.}\Psi}$  – интервал квантования управления в прямом канале контура потокосцепления, с;

$T_{\text{ф.о}\Psi}$  – постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения потока,  $T_{\text{ф.о}\Psi} = 0$  с, т.к. фильтр отсутствует;

$N_{3\Psi.\text{макс}}$  – максимальное значение задания на входе контура потокосцепления, соответствующее значению номинального потокосцепления ротора двигателя  $\Psi_{2\text{н}}$ , в относительных единицах

$$N_{3\Psi.\text{макс}} = \frac{1}{\sigma_{\Psi}}.$$

### ***Расчетные параметры настройки контура потокосцепления с аналоговым датчиком***

Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления

$$W(p)_{\text{р}\Psi} = k_{\text{р}\Psi} \cdot \frac{T_{\text{р}\Psi} \cdot p + 1}{T_{\text{р}\Psi} \cdot p}.$$

Параметры настройки регулятора потокосцепления ротора:

– постоянная времени регулятора

$$T_{\text{р}\Psi} = T_2 = 0,395 \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора

$$k_{\text{р}\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_{\text{т}}}{L_m \cdot k_{\Psi} \cdot a_{\Psi} \cdot T_{\mu\Psi\text{э}}} = \frac{0,395 \cdot 0,0085}{0,031 \cdot 0,906 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = 74,847,$$

где

$$k_{\Psi} = \frac{N_{3\Psi.\text{макс}}}{\Psi_{2\text{н}}} = \frac{1}{\sigma_{\Psi} \cdot \Psi_{2\text{н}}} = \frac{1}{1,2 \cdot 0,92} = 0,906 \text{ 1/Вб}$$

– коэффициент обратной связи по потоку;

$$T_{\mu\Psi\text{э}} = T_{\text{т}} + \frac{T_{\text{ос.}\Psi}}{n_{\Psi}} + T_{\text{ф.о}\Psi} = 3 \cdot 10^{-4} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2} + 0 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура потокосцепления;

$n_{\Psi} = 1 \div 3$  – коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном, принят  $n_{\Psi} = 2$  – настройка контура близка к типовой настройке на МО ( $\sigma \approx 5\%$ );

$a_{\Psi} = 2$  – коэффициент типовой настройки контура потокосцепления на модульный оптимум (МО).

Коэффициент согласования выходного сигнала обратной связи и задания на входе контура потокосцепления

$$k_{\text{ос.}\Psi} = k_{\Psi}.$$

Допустимое значение сигнала управления на входе контура потокосцепления

$$N_{3\Psi} = k_{\Psi} \cdot \Psi_{2\text{н}} = 0,906 \cdot 0,92 = 0,833.$$

Допустимое значение выходного сигнала регулятора потокосцепления ротора ограничено на постоянном уровне

$$N_{\text{р}\Psi \text{ доп}} = N_{\text{зт. макс}} = k_{\text{т}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{эп. макс}} = 0,0085 \cdot \sqrt{2} \cdot 69,3 = 0,833.$$

## 4. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА И ЕЁ ИССЛЕДОВАНИЕ

### 4.1. Имитационные исследования нелинейной САУ регулируемого электропривода

Модели регулируемого асинхронного электропривода с частотным векторным управлением реализуются на основе схем:

- функциональной с моделью двухфазного двигателя (рисунок 4.1);
- функциональной с моделью трехфазного инвертора напряжения с ШИМ (рисунок 4.2).
- структурной схемы нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода с точной моделью двухфазного асинхронного двигателя при векторном управлении (рисунок 4.3).

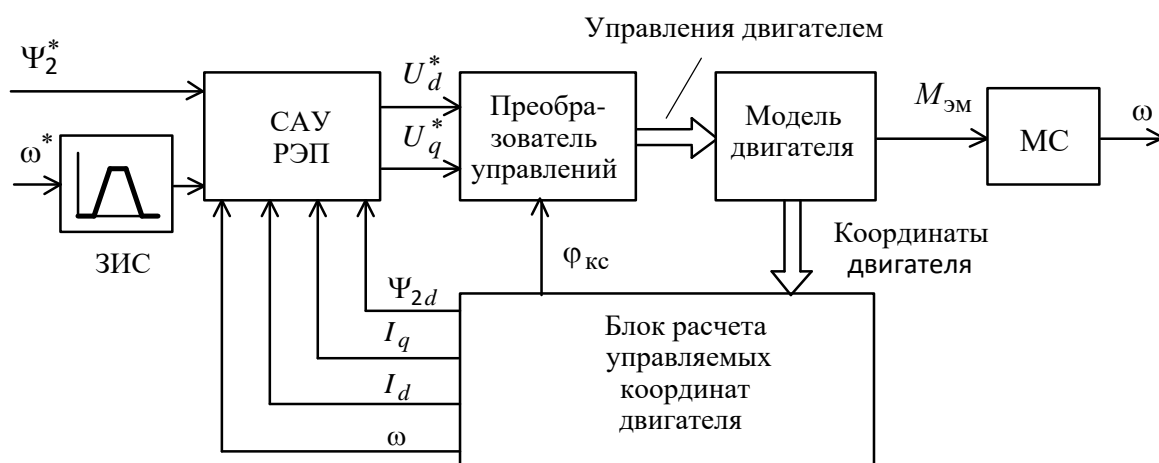


Рисунок 4.1 – Функциональная схема имитационной модели асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и моделью двухфазного двигателя без датчиков потока и скорости

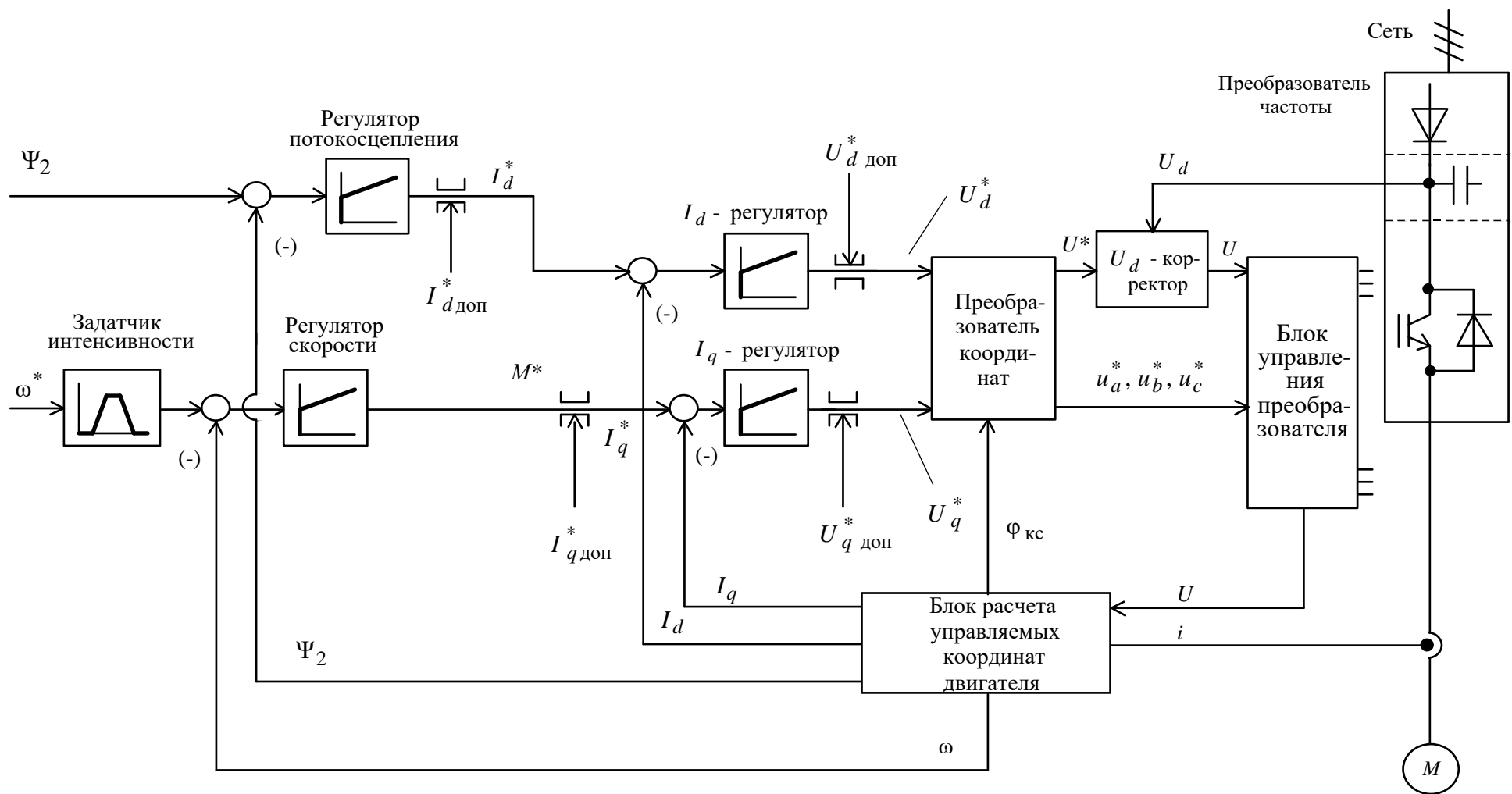


Рисунок 4.2 – Функциональная схема асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и моделью трехфазного инвертора напряжения с ШИМ без датчиков потока и скорости

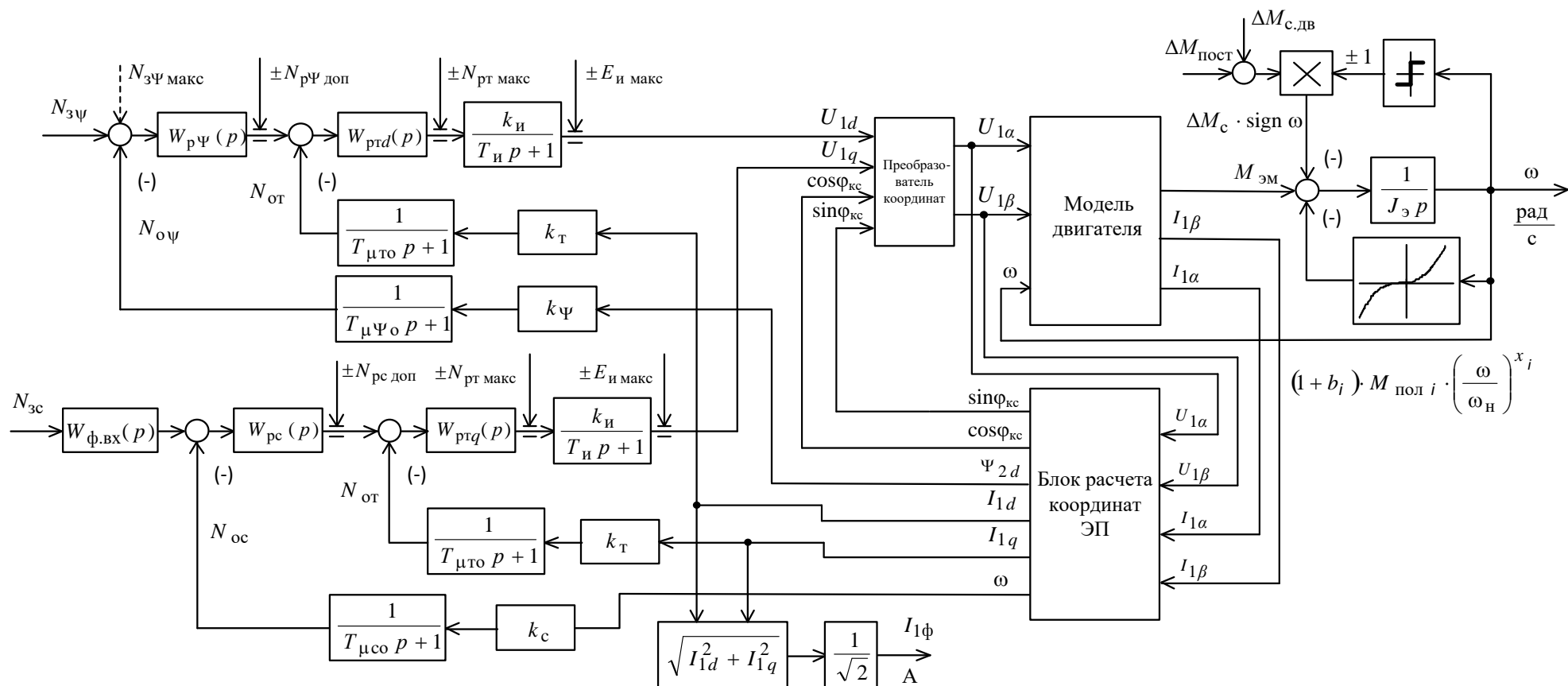


Рисунок 4.3– Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении с точной моделью двухфазного асинхронного двигателя без датчика потока и скорости

## ***Имитационная модель нелинейной САУ регулируемого электропривода***

Схема набора имитационной модели нелинейной САУ регулируемого электропривода, составленная на основании структурной схемы рисунок 4.3, приведена на рисунке 4.4.

В состав имитационной модели нелинейной САУ регулируемого электропривода рисунок 4.4 входят суперблоки:

- имитационная модель двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат (рисунок 4.5);
- имитационная модель ПИ-регулятора скорости с управляемым значением ограничения выходного сигнала (рисунок 4.6);
- имитационная модель ПИ-регулятора тока  $I_q$  с положительной обратной связью по скорости двигателя и управляемым значением ограничения выходного сигнала (рисунок 4.7);
- имитационная модель ПИ-регулятора потокосцепления и тока  $I_d$  с ограничением интегральной составляющей в режиме насыщения (рисунок 4.8);
- имитационная модель одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера (рисунок 4.9);
- имитационная модель блока расчета координат электропривода (рисунок 4.10);
- Имитационная модель блока расчета потокосцеплений ротора в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  по измеренным значениям токов  $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$  и расчетным значениям напряжений управления  $u_{1\alpha}, u_{1\beta}$  (рисунок 4.11);
- имитационная модель блока расчета потокосцепления ротора  $\psi_{2d}$  и угла положения координатной системы  $\varphi_{\kappa c}$  по расчетным значениям токов  $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$  и скорости вращения двигателя (рисунок 4.12);



– имитационная модель преобразователя напряжений статора двухфазного двигателя из вращающейся координатной системы  $d, q$  в неподвижную систему координат  $\alpha, \beta$  (рисунок 4.13 а) и из неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$  во вращающуюся координатную систему  $d, q$  (рисунок 4.13 б);

– имитационная модель преобразователя координат из неподвижной двухфазной координатной системы  $\alpha, \beta$  в неподвижную трехфазную систему координат  $a, b, c$  (рисунок 4.14 а) и из неподвижной трехфазной системы координат  $a, b, c$  в неподвижную двухфазную координатную систему  $\alpha, \beta$  (рисунок 4.14 б);

– формирователя фазного тока двигателя  $I_{1\phi}$  (рисунок 4.15);

– блок формирования нагрузки (рисунок 4.16)



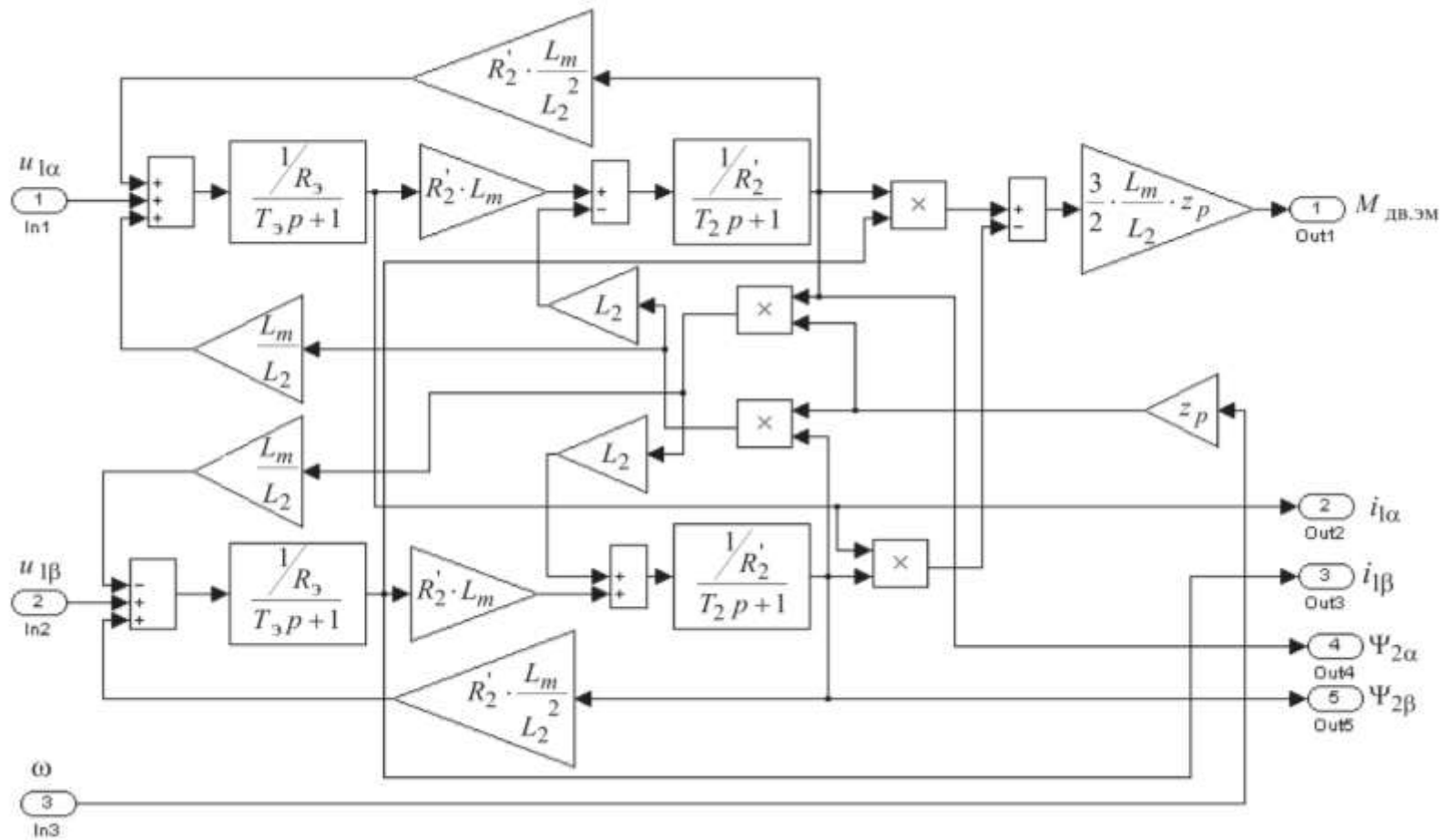


Рисунок 4.5 – Имитационная модель электрической части двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$

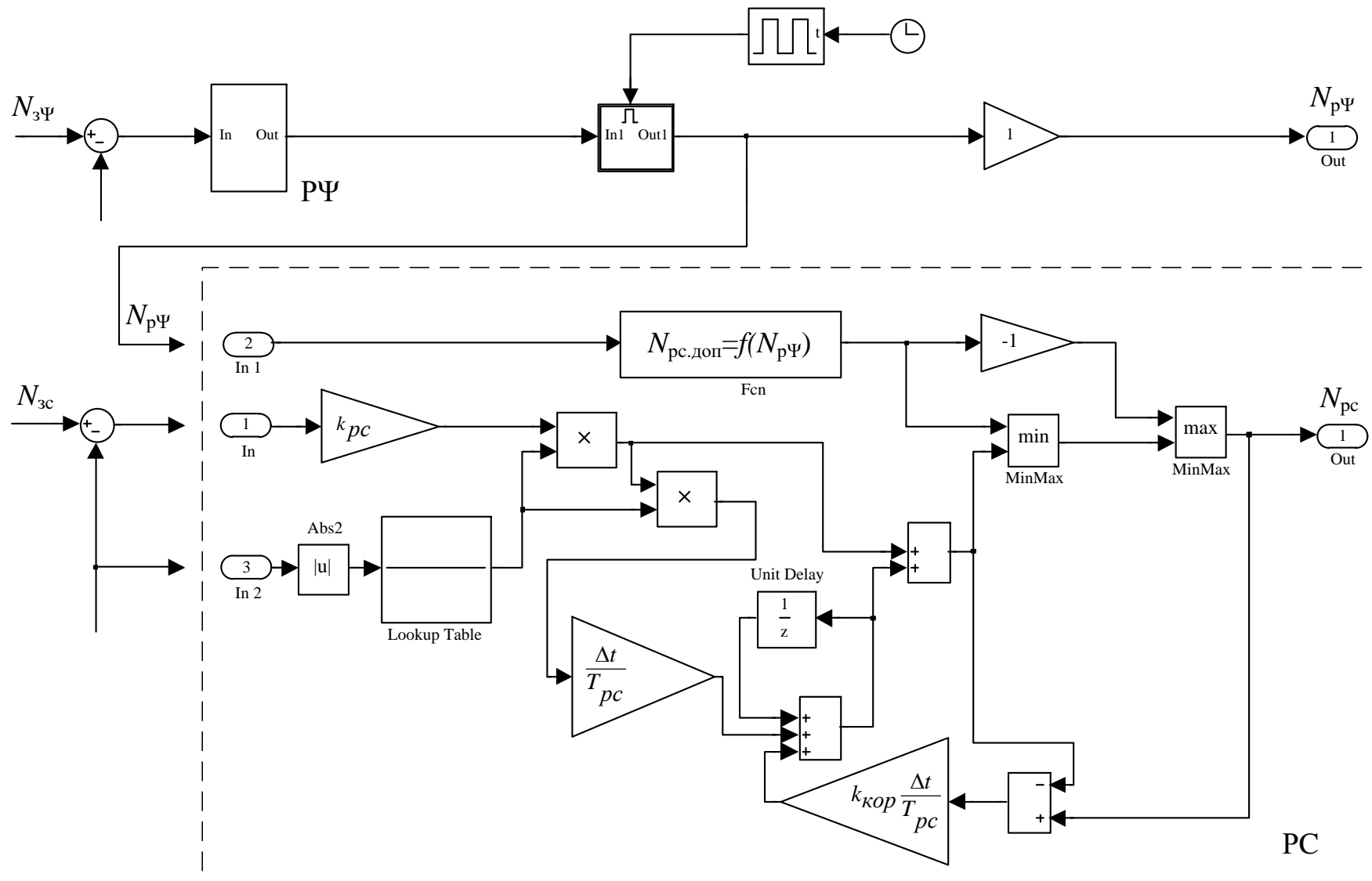


Рисунок 4.6 – Имитационная модель адаптивного ПИ-регулятора скорости с управляемым значением ограничения  
ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

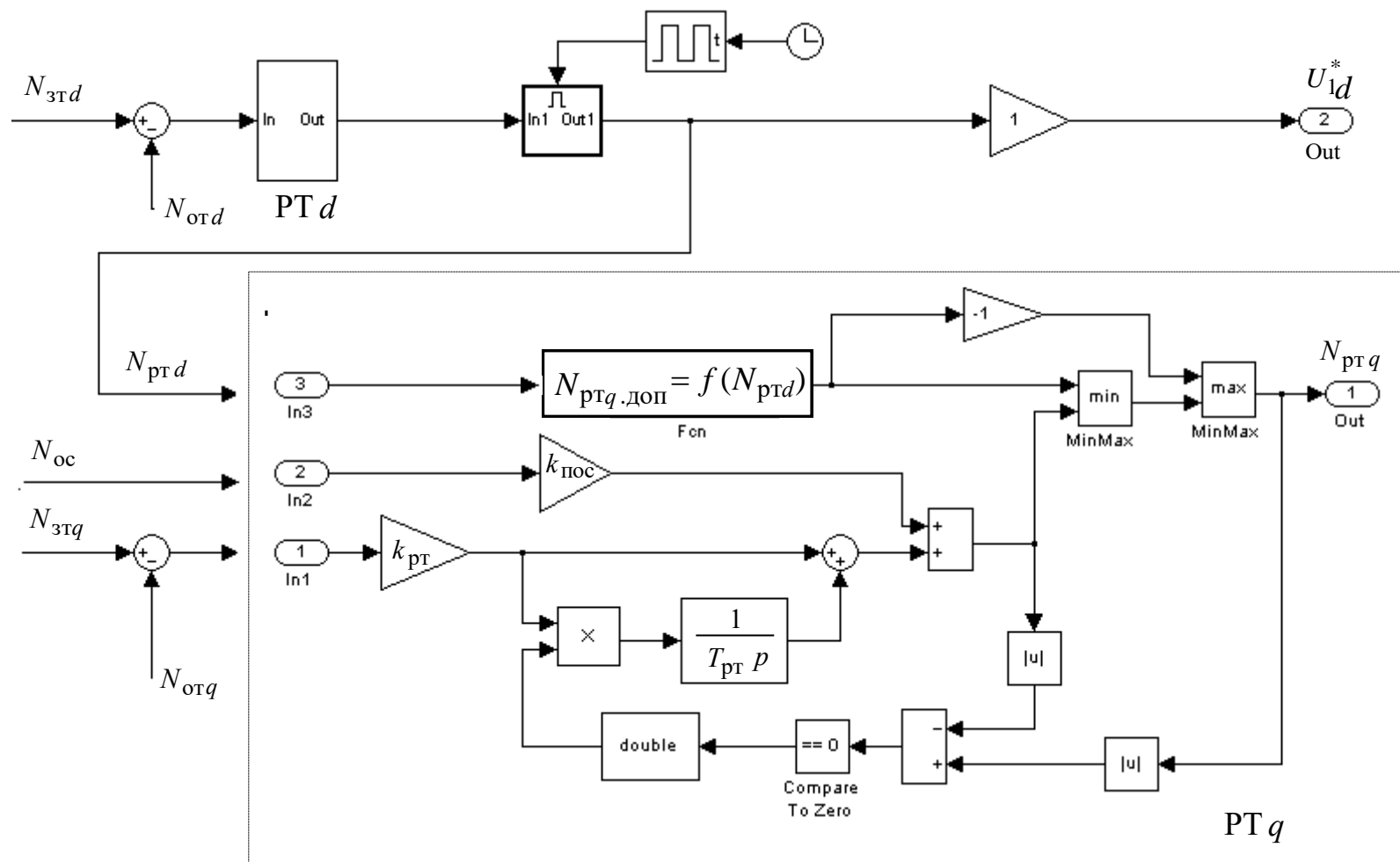


Рисунок 4.7 – Имитационная модель ПИ-регулятора тока  $I_q$  с положительной обратной связью по скорости двигателя и управляемым значением ограничения выходного сигнала

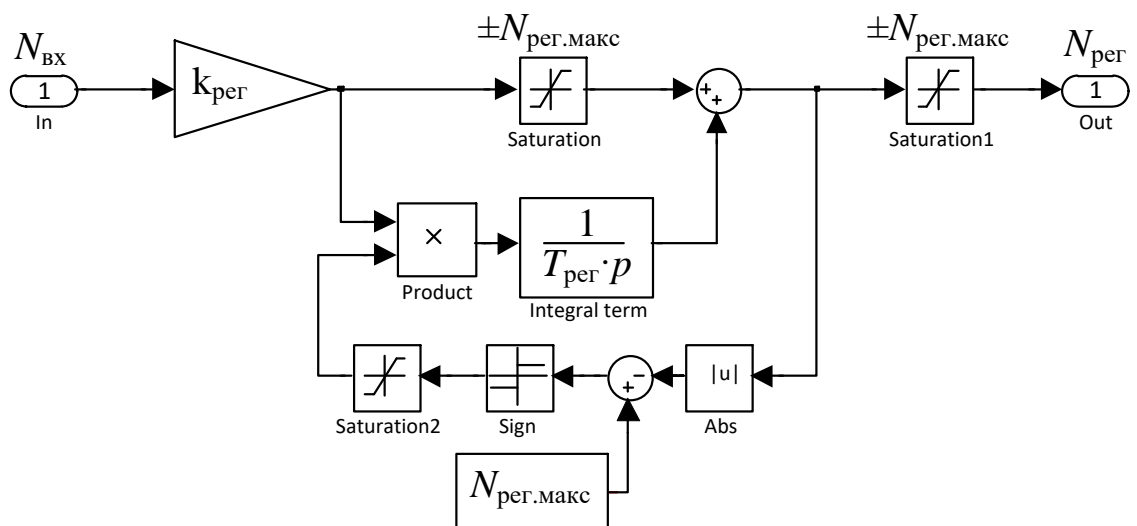


Рисунок 4.8 – Имитационная модель ПИ-регулятора потокосцепления и тока  $I_d$  с ограничением интегральной составляющей в режиме насыщения

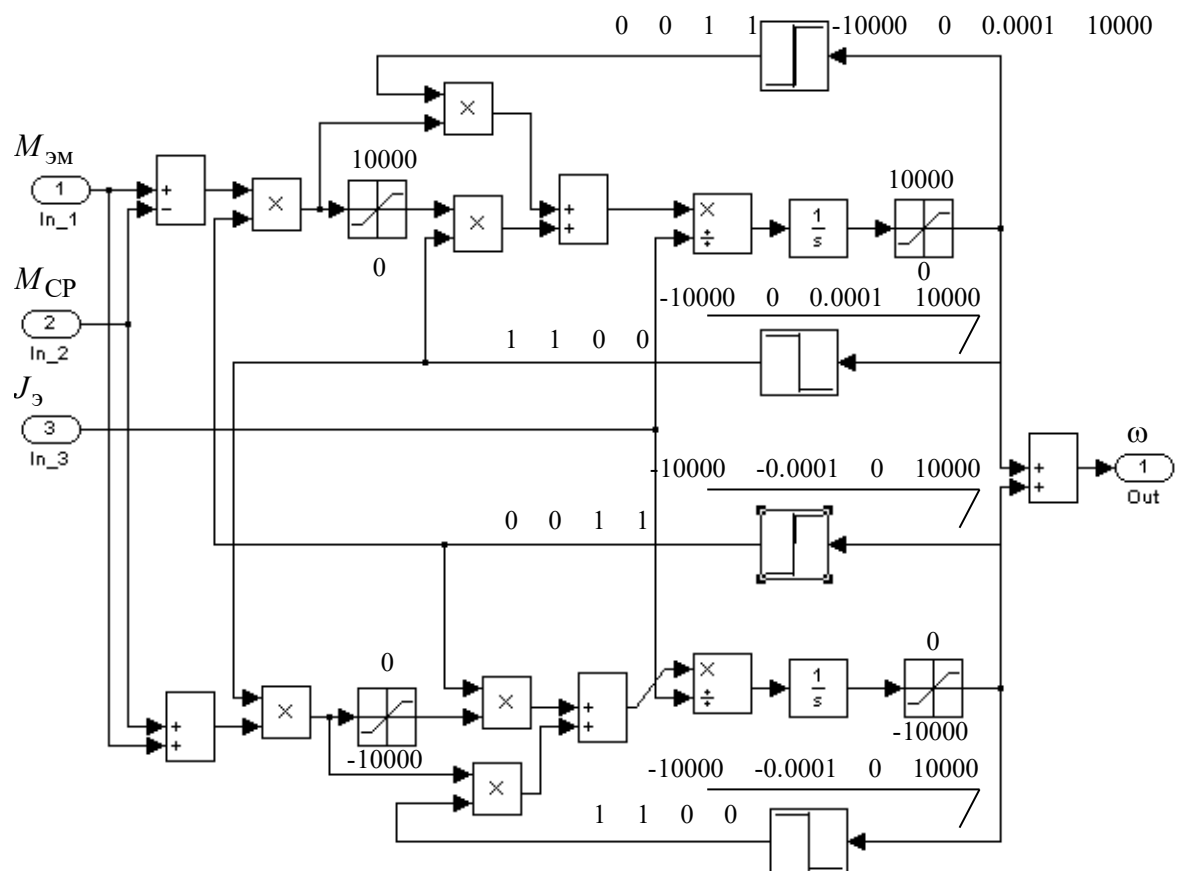


Рисунок 4.9 – Имитационная модель одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера

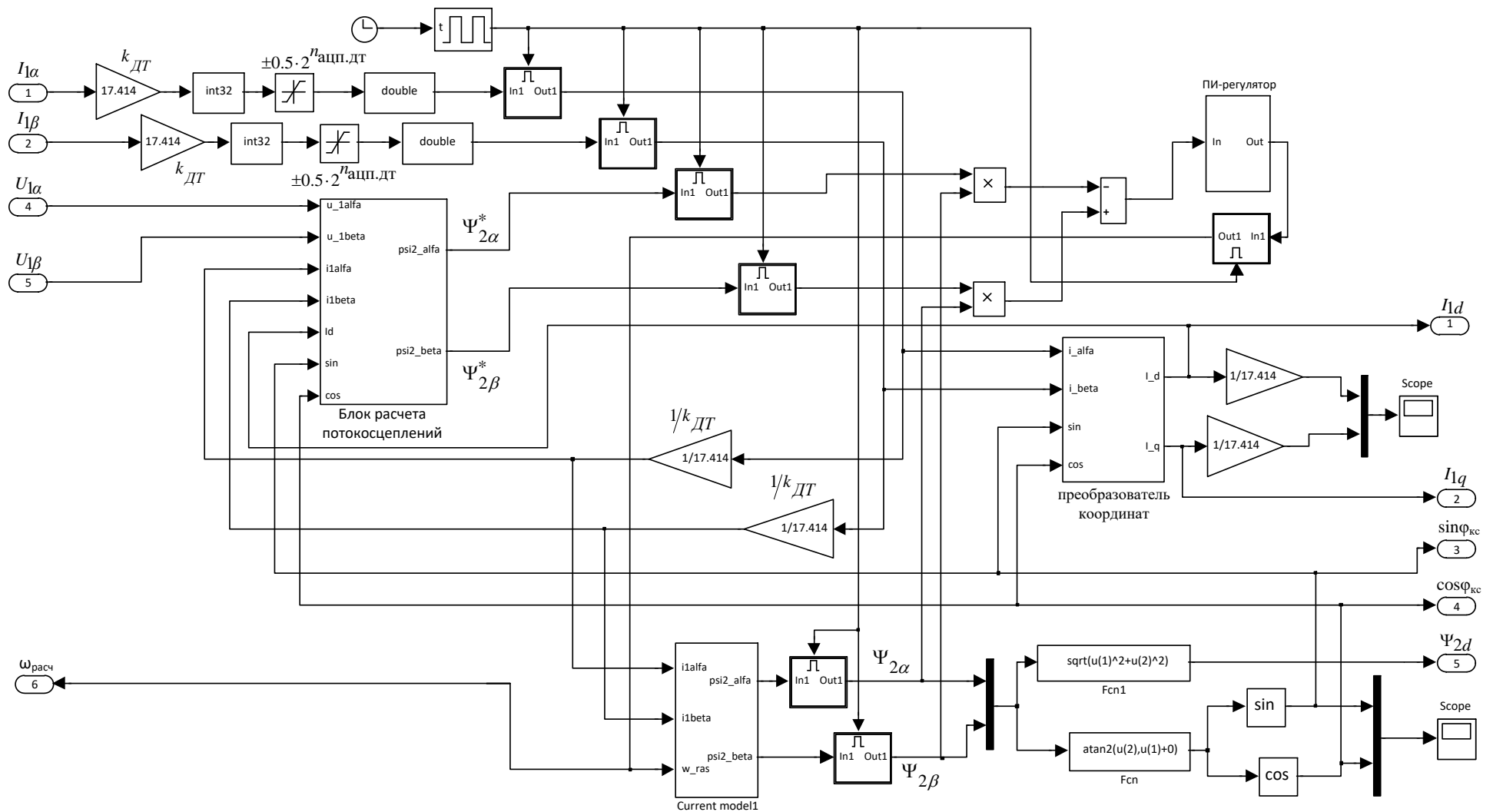


Рисунок 4.10 – Имитационная модель блока расчета координат электропривода

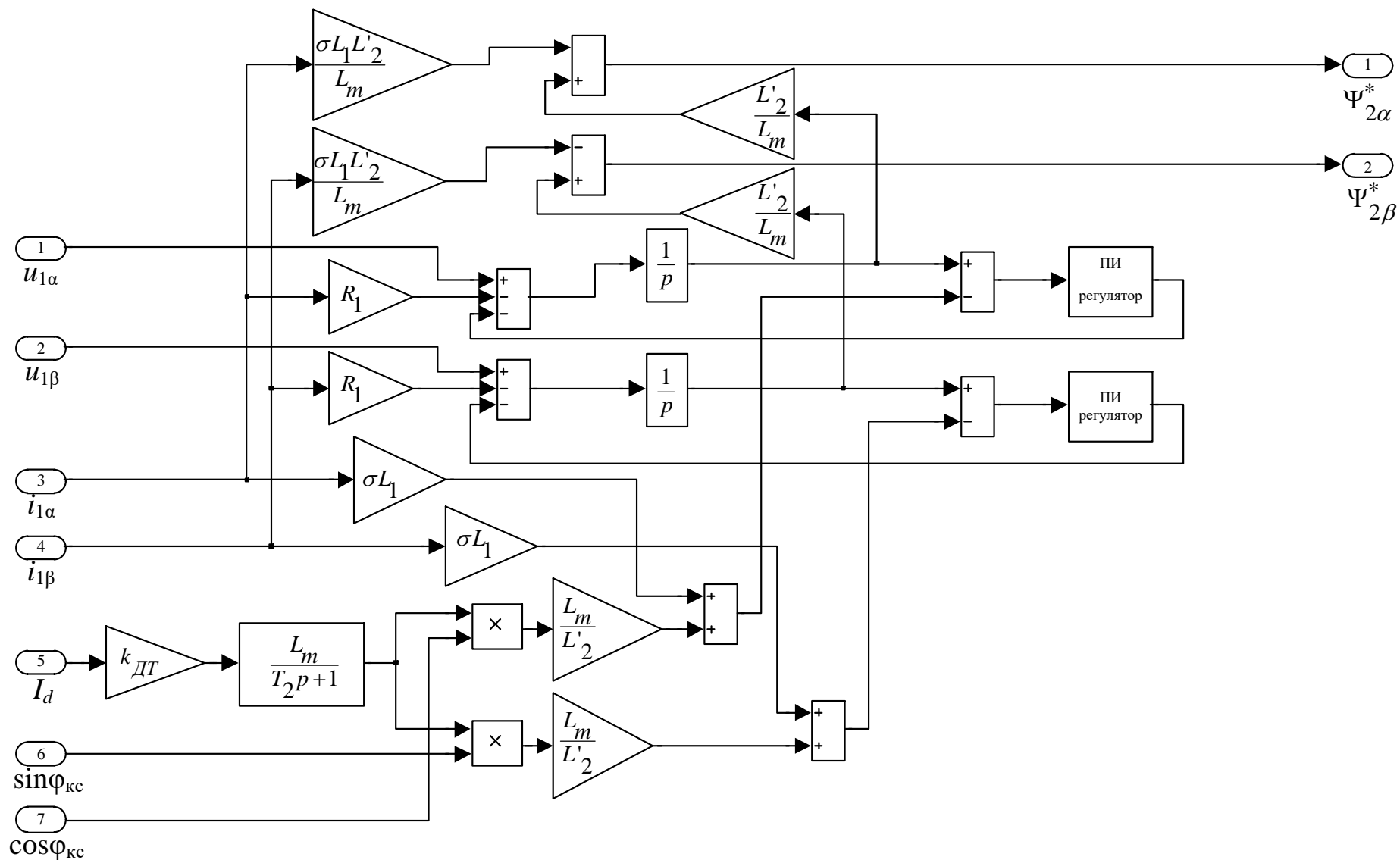


Рисунок 4.11 – Имитационная модель блока расчета потокосцеплений ротора в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  по измеренным значениям токов  $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$  и расчетным значениям напряжений управления  $u_{1\alpha}, u_{1\beta}$



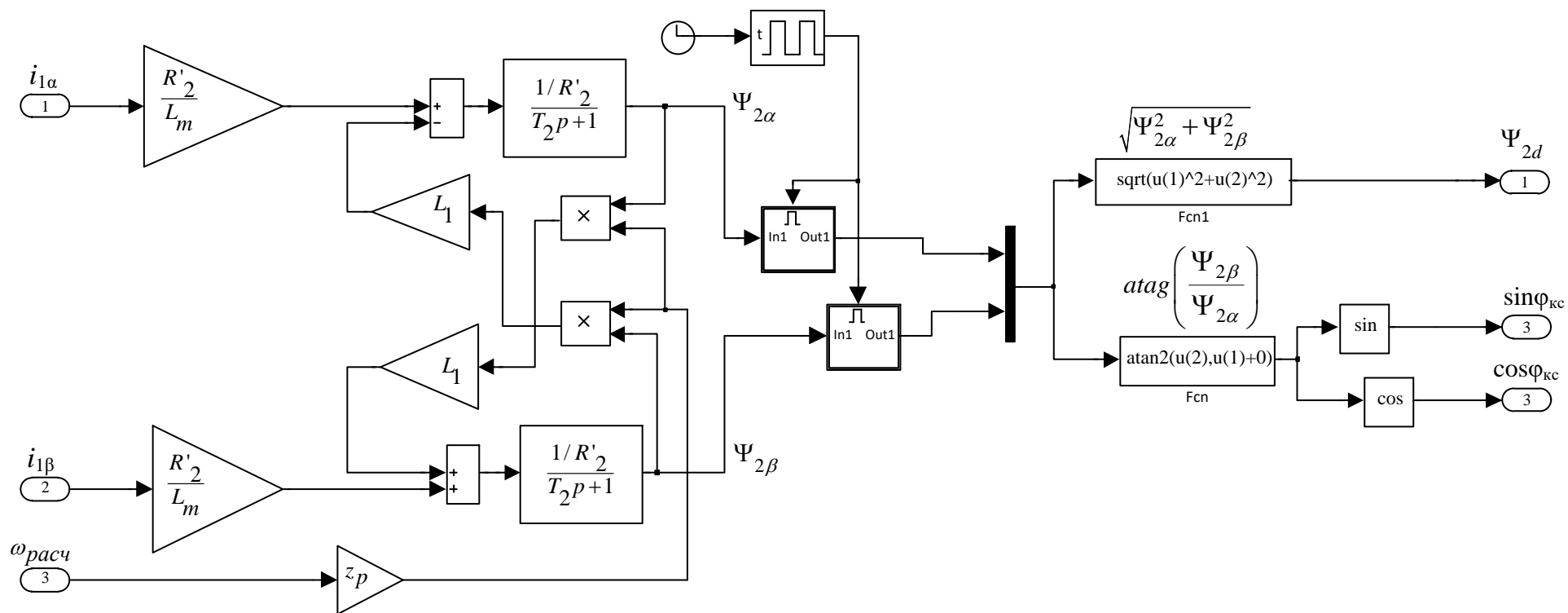


Рисунок 4.12 – Имитационная модель блока расчета потокосцепления ротора  $\Psi_{2d}$  и угла положения координатной системы  $\varphi_{к}$  по измеренным значениям токов  $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$  и расчетной скорости вращения двигателя.

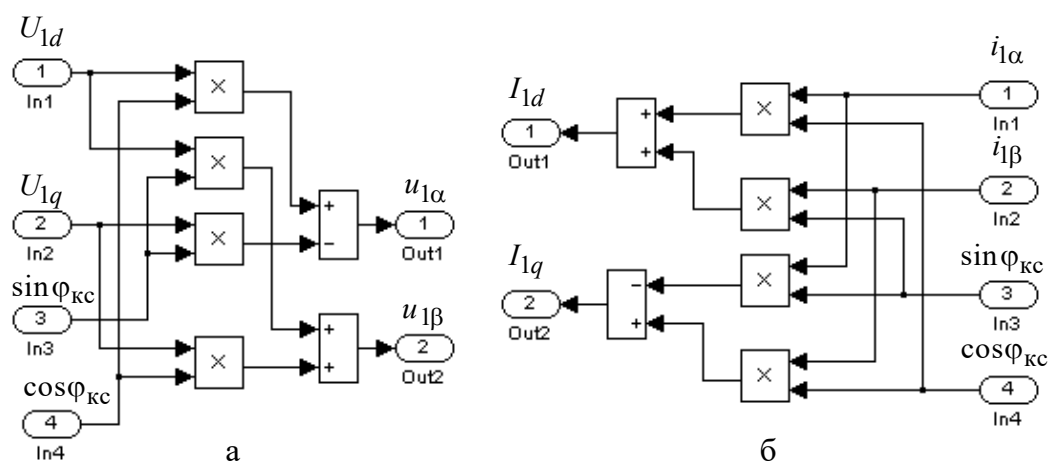


Рисунок 4.13 – Имитационная модель преобразователя координат: *a* – из вращающейся координатной системы *d, q* в неподвижную систему координат *α, β*; *б* – из неподвижной системы координат *α, β* во вращающуюся координатную систему *d, q*

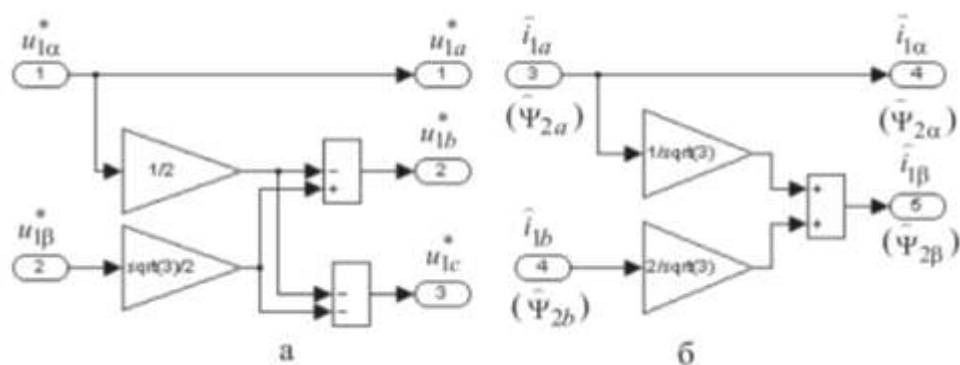


Рисунок 4.14 – Имитационная модель преобразователя координат: *a* – из неподвижной двухфазной координатной системы *α, β* в неподвижную трехфазную систему координат *a, b, c*; *б* – из неподвижной трехфазной системы координат *a, б, c* в неподвижную двухфазную координатную систему *α, β*

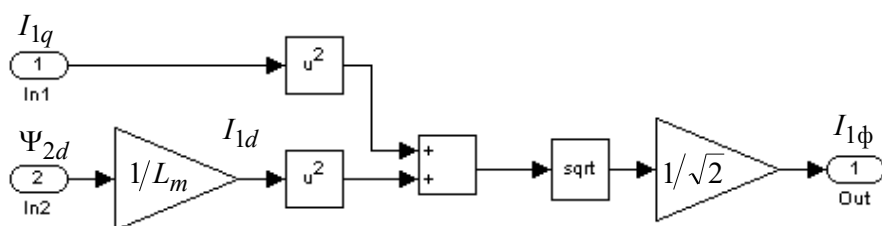


Рисунок 4.15 – Имитационная модель вычислителя действующего значения тока статора трехфазного двигателя

Блок формирования нагрузки (рисунок 4.16) реализован в соответствии с выражением механической характеристики полного момента сопротивления на валу электродвигателя (2.2), соответствующей режиму регулирования производительности с номинальным КПД  $\eta_H = 0,83$

$$M_{ci}(\omega) = \Delta M_c + (1 + b_i) \cdot M_{поли} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^{x_i} =$$

$$= 36,322 + (1 + 0,102) \cdot 188,771 \cdot \left( \frac{\omega}{102,625} \right)^{2,18},$$

где  $\Delta M_c = \Delta M_{c.дв} + \Delta M_{пост} = 16,99 + 19,332 = 36,322$  Н·м – момент сопротивления от сил трения, приведенный к валу двигателя.

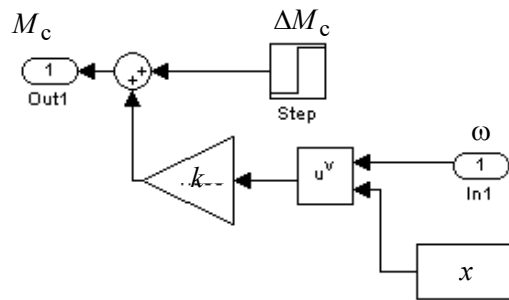


Рисунок 4.16 – Имитационная модель формирователя нагрузки

С целью обеспечения плавных переходных процессов при пуске частотно-регулируемых асинхронных электроприводов производится первоначальный прямой пуск двигателя на минимальную частоту  $f_{\text{и мин}}$ , а затем по окончании переходного процесса, когда потокосцепление достигнет установившегося значения, осуществляется дальнейший разгон привода от задатчика интенсивности до значения заданной скорости. Установка линейного задатчика скорости обеспечивает постоянное значение темпа нарастания (спадания при торможении) скорости, т. е. постоянное ускорение (замедление) привода, что достигается поддержанием постоянного значения динамического момента электропривода.

Был выбран задатчик интенсивности с линейной характеристикой (рисунок 4.17) и параметрами: максимальное значение задания управления на входе задатчика интенсивности  $N_{\text{зс.макс}} = 0,667$ ; максимальное значение управления на выходе задатчика  $N_{\text{зс.макс}} = 0,667$ ; постоянная времени задатчика  $T_{\text{зи}} = 4 \text{ с}$ .

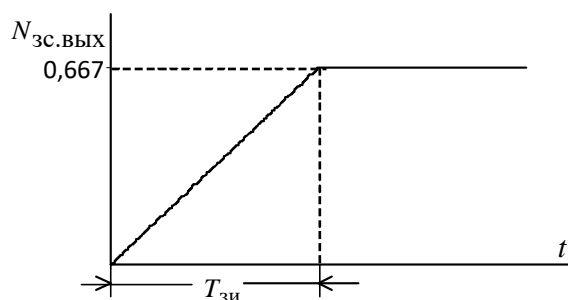


Рисунок 4.17 – Временная характеристика линейного задатчика интенсивности

Схема набора имитационной модели линейного задатчика интенсивности приведена на рис. 4.18 [13].

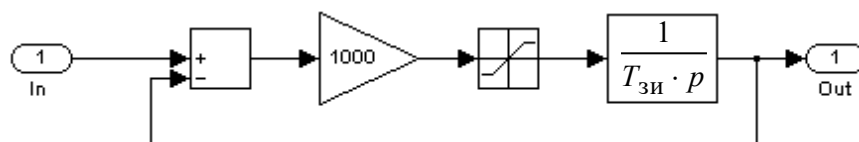


Рисунок 4.18 – Схема набора имитационной модели управляемого линейного задатчика интенсивности.

### ***Результаты имитационных исследований САУ регулируемого электропривода***

Программа имитационных исследований регулируемого электропривода включает:

- анализ работы электропривода при перегрузке статическим моментом.

- пуск электропривода на заданную скорость в диапазоне регулирования от  $\omega_{\text{эп.мин}}$   $D=1:10$  до  $\omega_{\text{эп.макс}}$ ;
- регулирование скорости: переход с меньшей скорости на большую скорость и, наоборот, в заданном диапазоне регулирования;
- останов электропривода с любой начальной скорости в заданном диапазоне регулирования;

Результаты имитационных экспериментов приведены на рисунках 4.19 – 4.25.

Анализ работы электропривода при перегрузке статическим моментом (рисунок 4.19) показал, что статическая ошибка на нижней рабочей скорости электропривода меньше 1 %.

На рисунке 4.21 показан переходный процесс пуска на минимальную скорость диапазона 1:10 и торможения частотно-регулируемого электропривода без задатчика интенсивности, а на рисунке 4.22 показан переходный процесс пуска на максимальную скорость и торможения. Анализ приведенных графиков показывает, что значение тока не превышает максимально допустимого, момент электропривода ограничен на уровне  $M_{\text{эп макс}}$ .

Процесс торможения характеризуется выделением мощности торможения, что требует специальных мер для ее рассеивания (тормозной резистор) или возврата в сеть (блок рекуперации), поэтому принято решение реализовать управляемые пуско-тормозные режимы с помощью применения задатчика интенсивности скорости.

Принят линейный задатчик интенсивности с постоянной времени  $T_{\text{зи}} = 4$  с. В ходе экспериментальных исследований на модели установлено, что пуско-тормозные переходные процессы в электроприводе с линейным задатчиком протекают достаточно плавно, обеспечивая требуемое значение динамического момента (рисунки 4.23 – 4.25). Время разгона и торможения электропривода до заданной скорости определяется постоянной времени

здатчика интенсивности и при выбранной настройке задатчика интенсивности не превышает 4 секунды.

Полученные результаты имитационных исследований подтверждают способность частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентилятора обеспечить выполнение технических требований по диапазону регулирования скорости, перегрузочной способности и плавности переходных процессов.

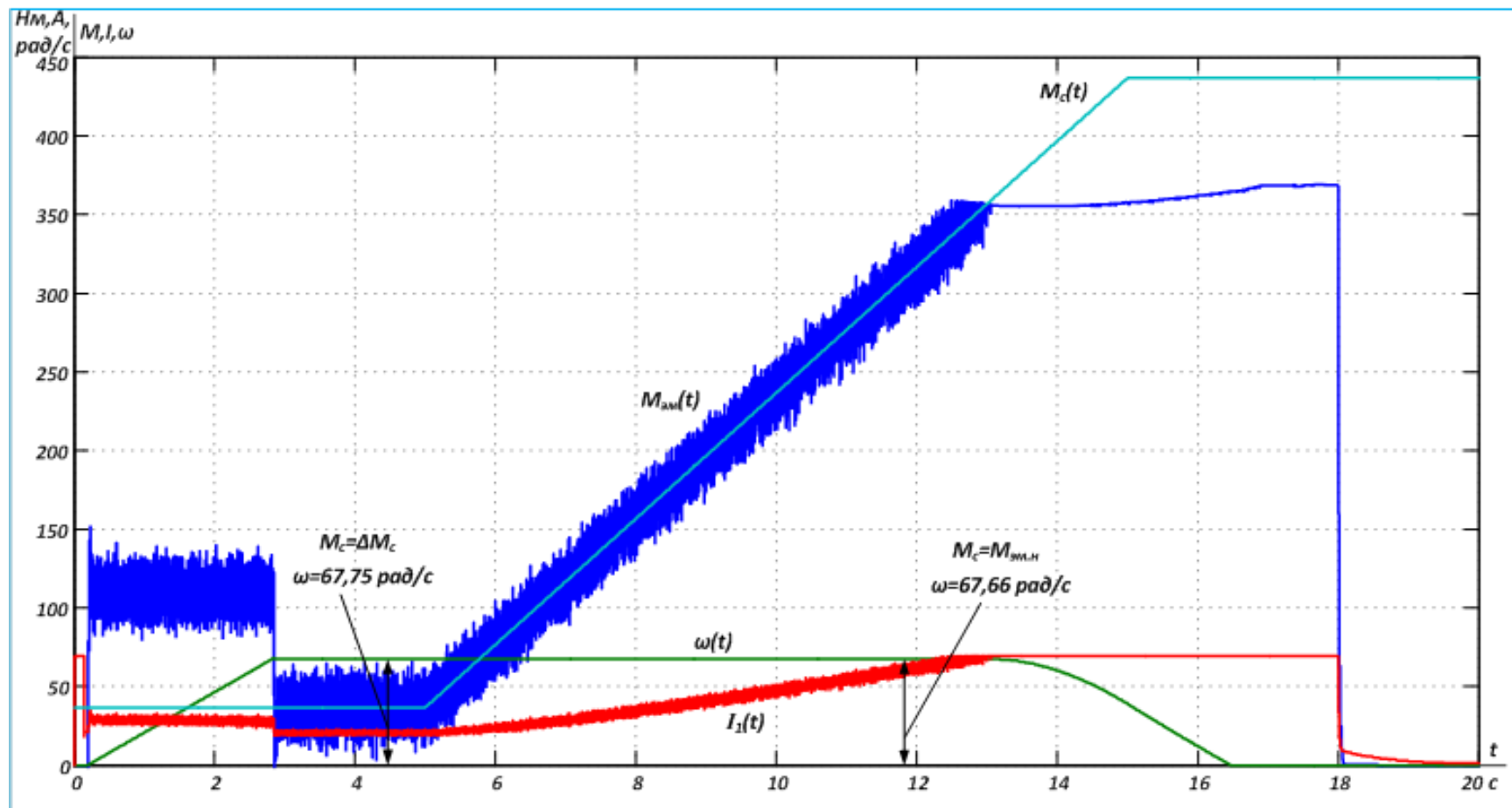


Рисунок 4.19 – Диаграммы работы электропривода при перегрузке статическим моментом на минимальной рабочей скорости

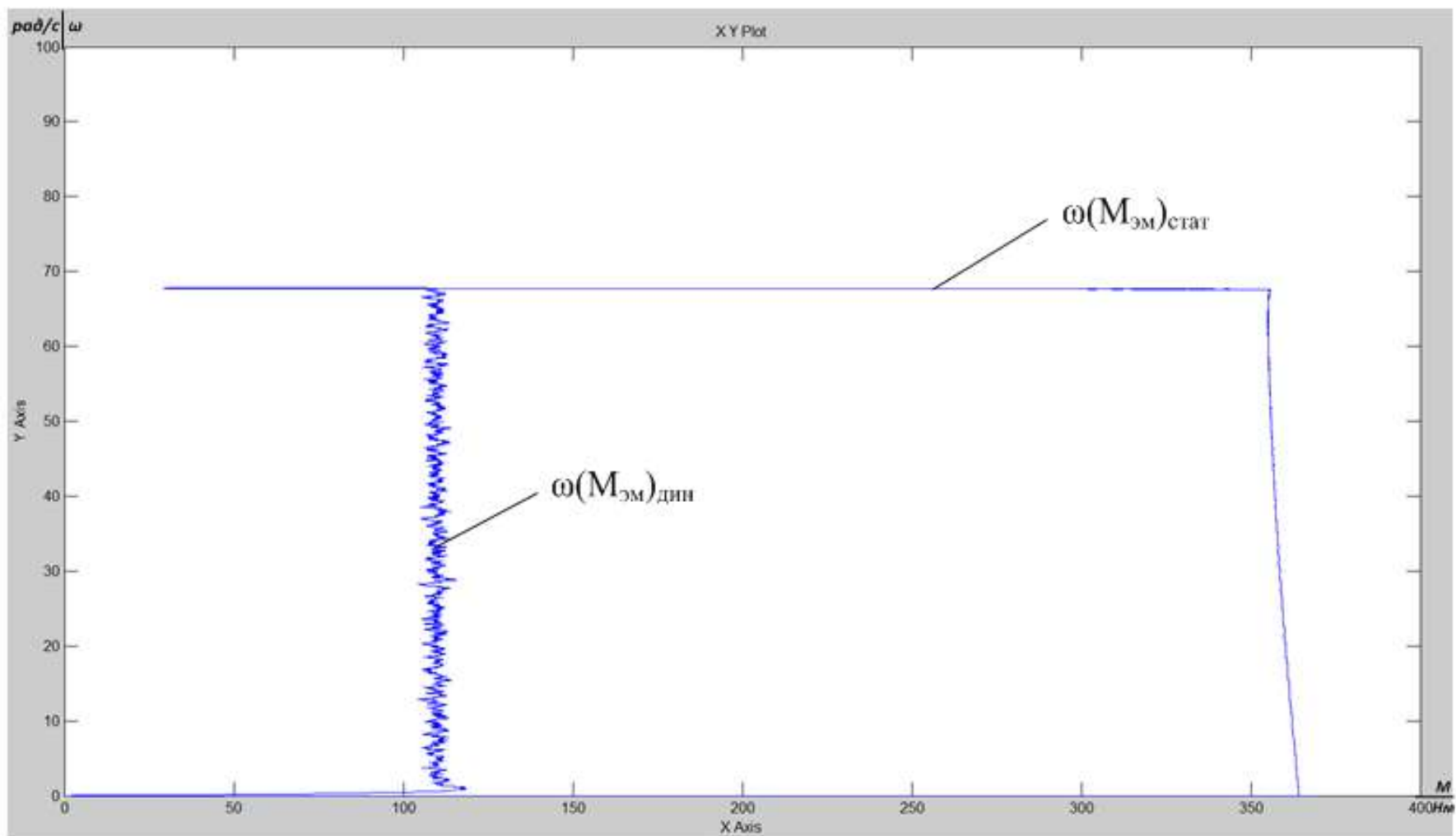


Рисунок 4.20 – Динамическая и статическая характеристики электропривода при  $\omega_{\text{зад}} = 67,75$  рад/с



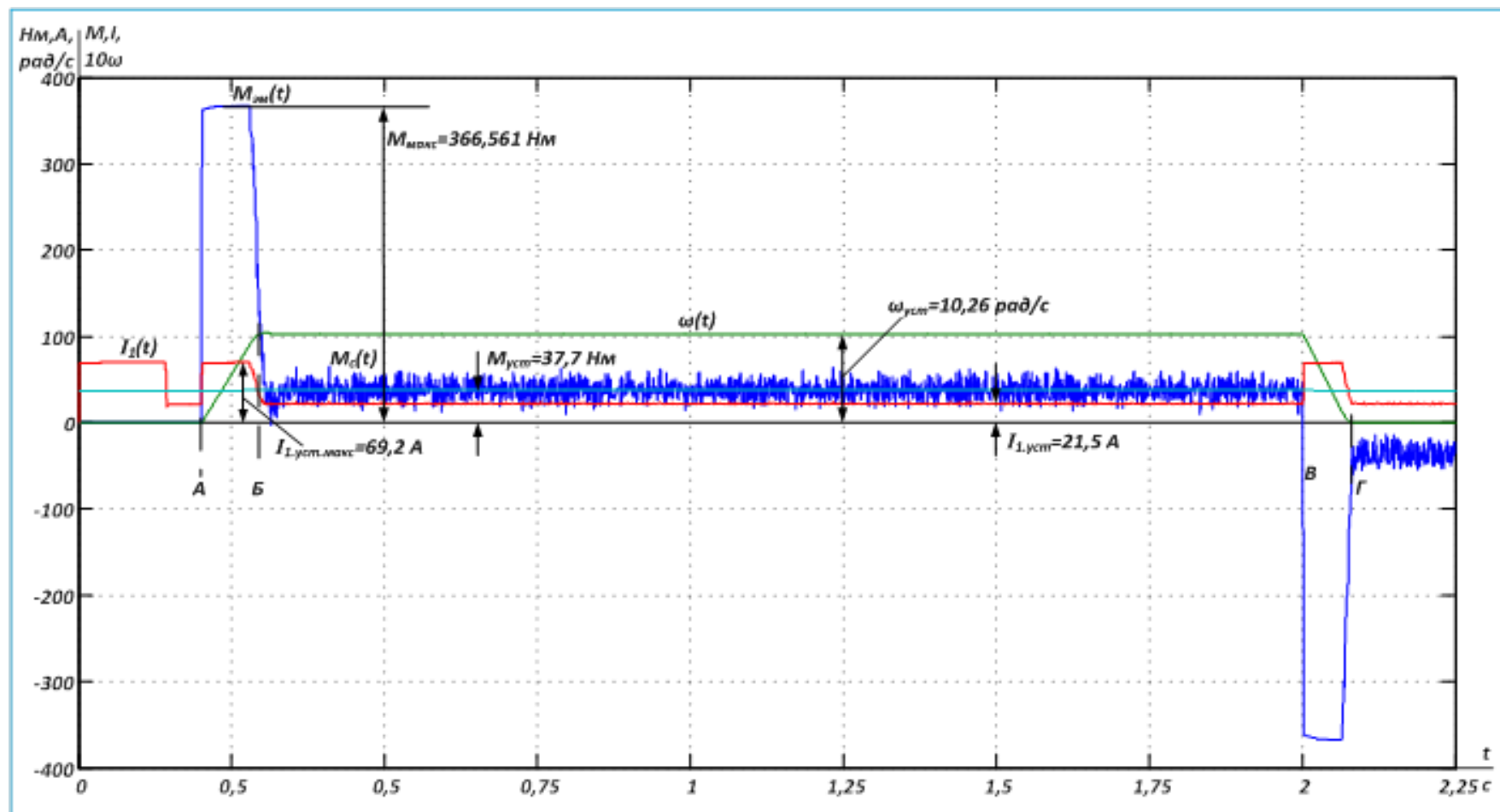


Рисунок 4.21 – Цикл работы электропривода без задатчика интенсивности: А – Б пуск на минимальную скорость диапазона 1:10, Б – В работа на минимальной скорости, В – Г останов

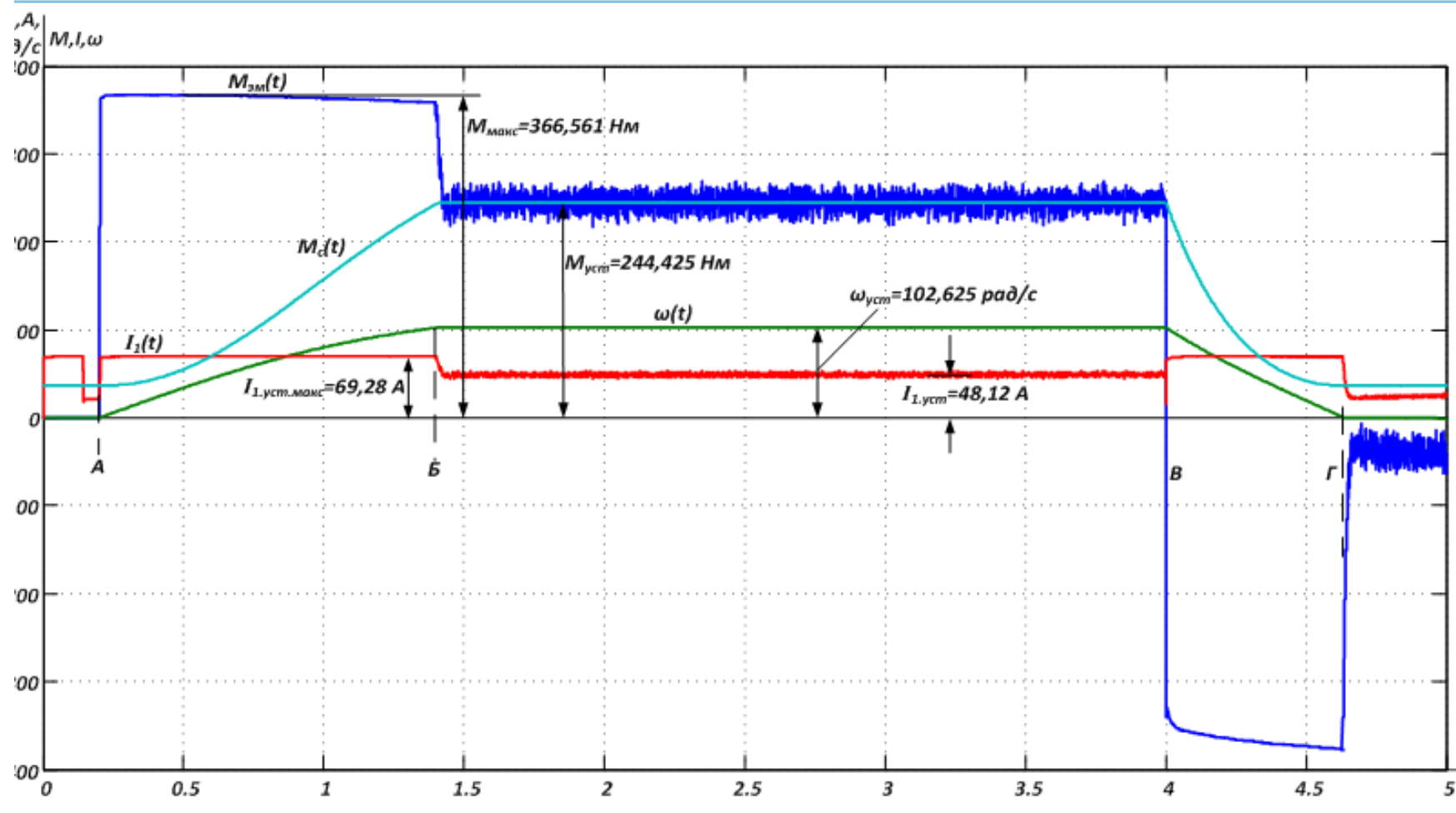


Рисунок 4.22 – Цикл работы электропривода без задатчика интенсивности: А – Б пуск на максимальную рабочую скорость, Б – В работа на максимальной рабочей скорости, В – Г останов

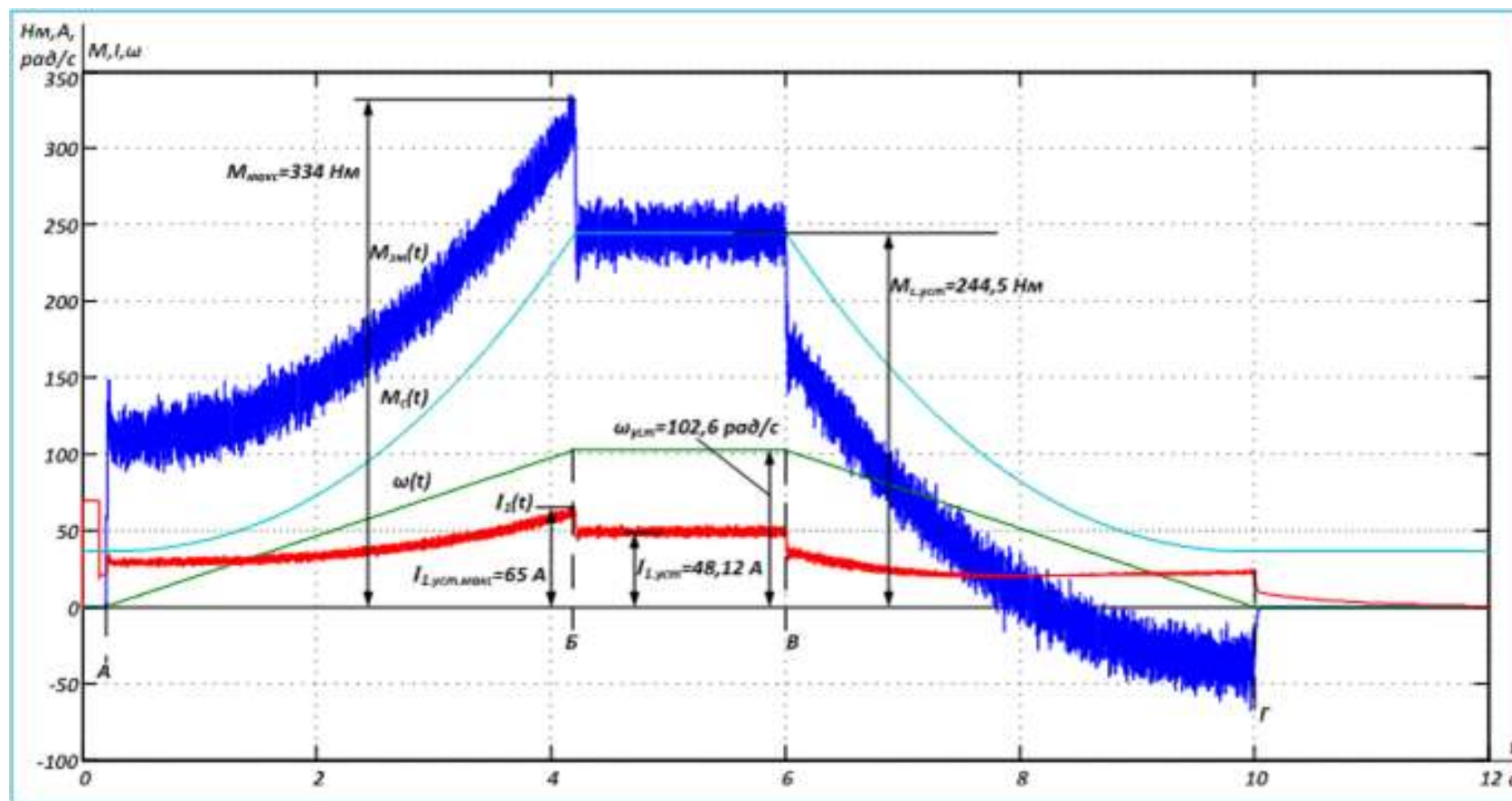


Рисунок 4.23 – Цикл работы электропривода с линейным задатчиком интенсивности: А – Б пуск на максимальную рабочую скорость, Б – В работа на максимальной рабочей скорости, В – Г останов

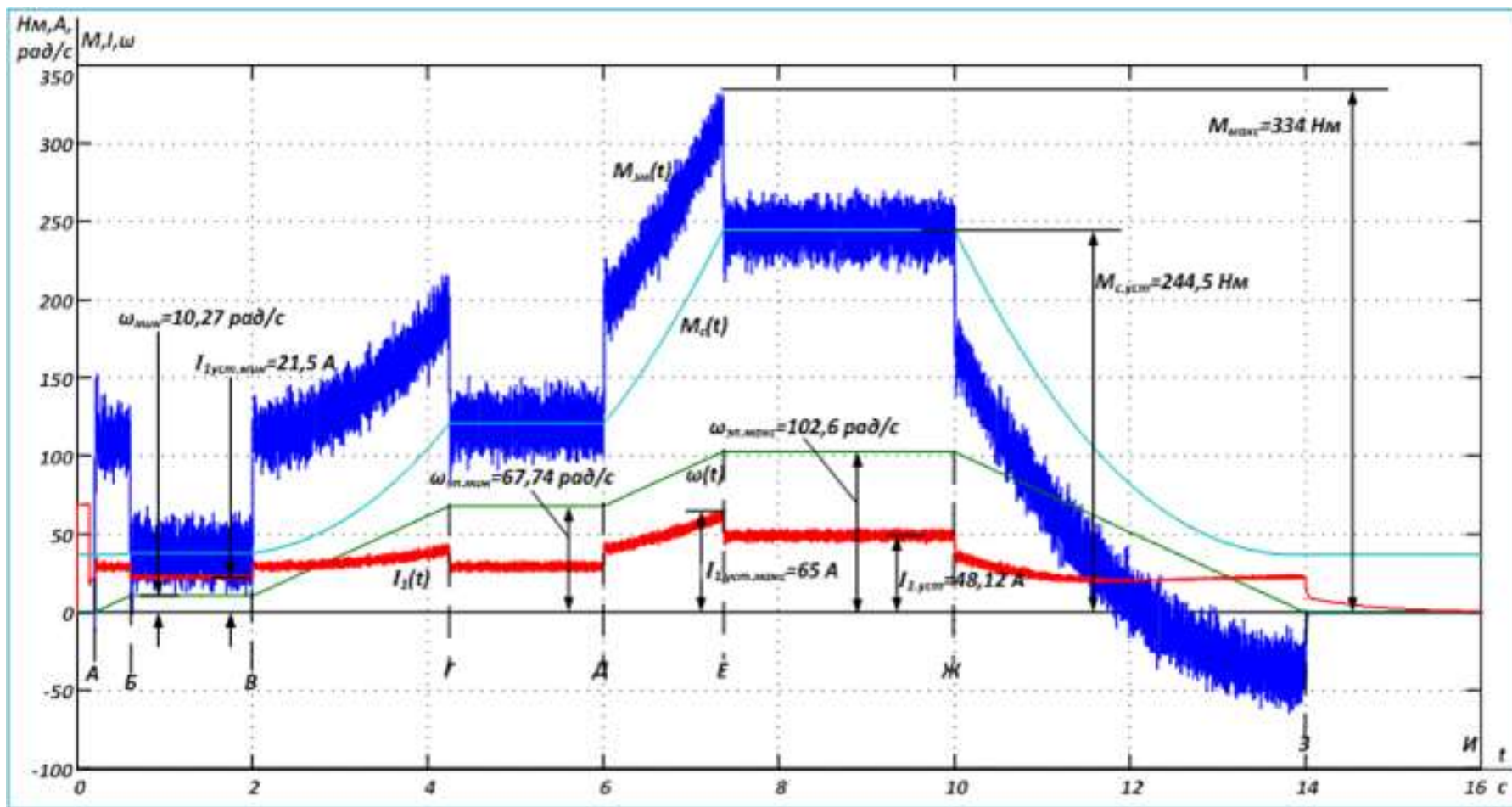


Рисунок 4.24 – Цикл работы электропривода с линейным задатчиком интенсивности: А – Б пуск на минимальную скорость диапазона 1:10, Б – В работа на минимальной скорости диапазона 1:10, В – Г пуск на минимально рабочую скорость, Г – Д работа на минимальной рабочей скорости, Д – Е пуск на максимально рабочую скорость, Е – Ж работа на максимальной рабочей скорости, Ж – З торможение, З – И останов

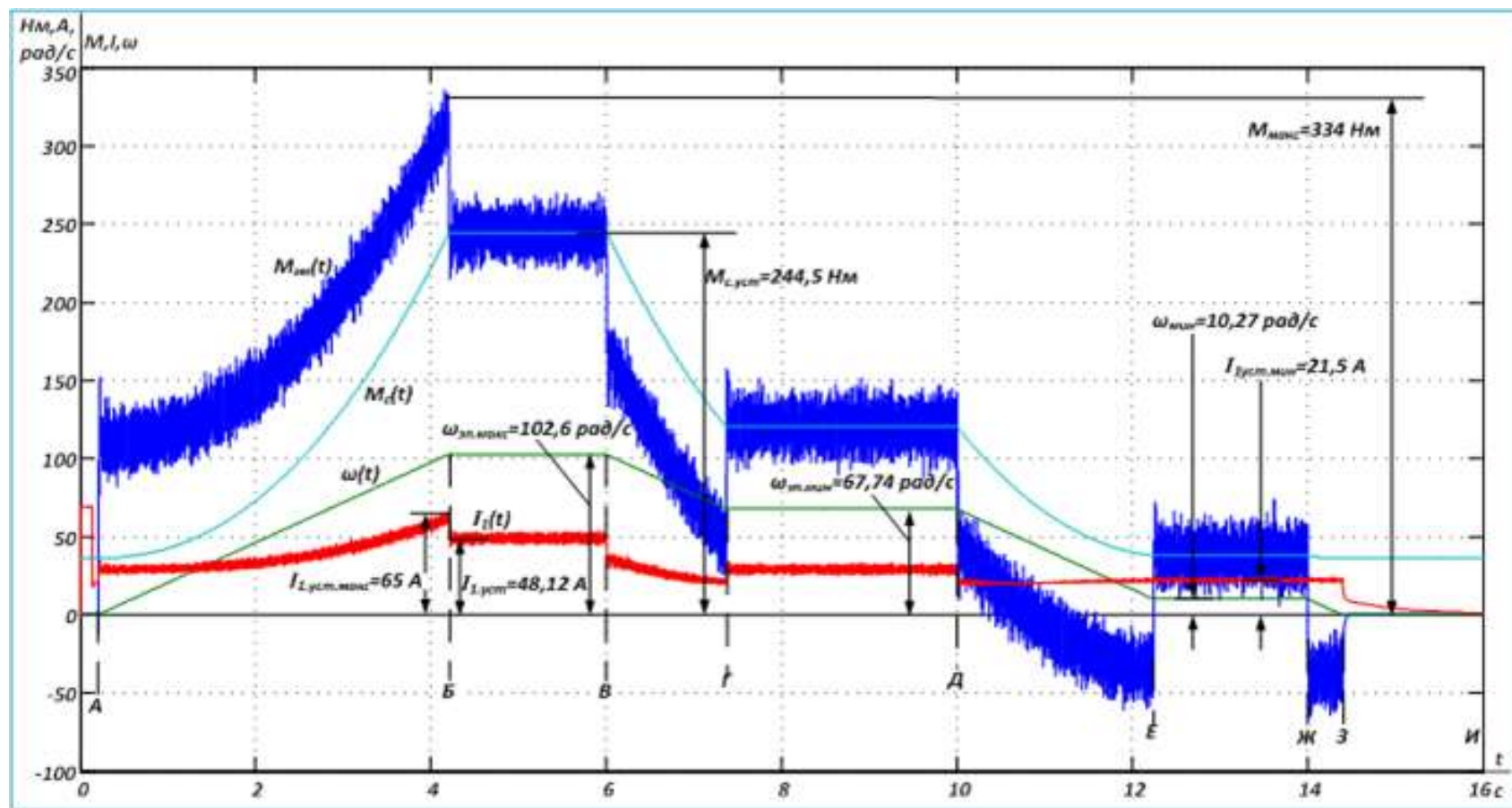


Рисунок 4.25 – Цикл работы электропривода с линейным задатчиком интенсивности: А – Б пуск на максимально рабочую скорость, Б – В работа на максимальной рабочей скорости, В – Г торможение до минимальной рабочей скорости, Г – Д работа на минимальной рабочей скорости, Д – Е торможение до минимальной скорости, Е – Ж работа на минимальной скорости, Ж – З торможение, З – И останов

## 4.2. Имитационные исследования работы САУ электропривода в составе технологической установки

Структурная схема системы автоматического регулирования давления воздуха перед горелкой приведена на рисунке 4.26.

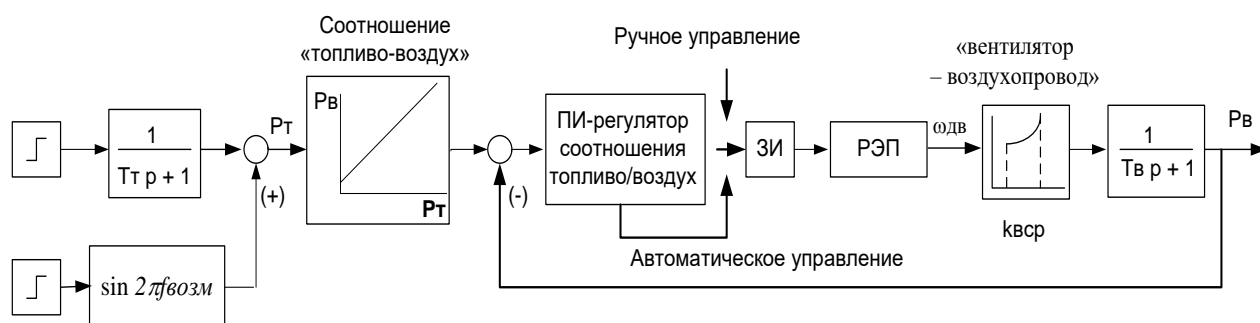


Рисунок 4.26 – Структурная схема системы автоматического регулирования давления воздуха перед горелкой

В состав структурной схемы входит частотно-регулируемый электропривод (РЭП), задатчик интенсивности скорости (ЗИС), регулятор соотношения топливо/воздух (ПИ-регулятор). Структурная схема РЭП приведена на рисунке 4.3.

Характеристика соотношения «топливо – воздух» приведена на рисунке 1.3, а характеристика системы «вентилятор-воздухопровод» показана на рисунке 4.27.

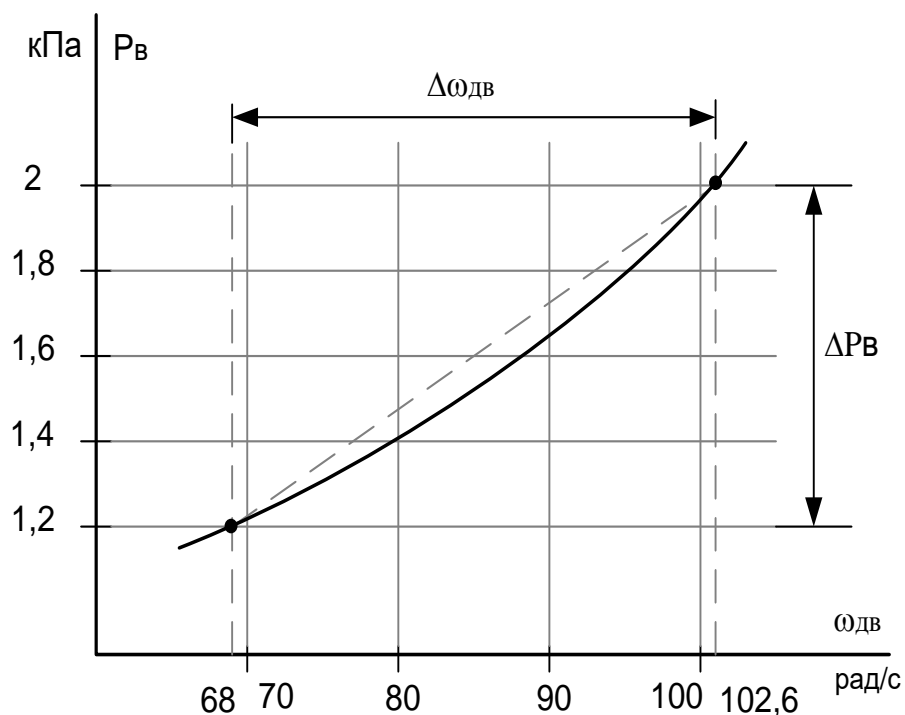


Рисунок 4.27 – Характеристика системы «вентилятор – воздухопровод»

$$P_B(\omega)$$

$$k_{\text{вср}} = \frac{\Delta P_B}{\Delta \omega_{\text{дв}}} = \frac{2 - 1,2}{102,6 - 68} = 0,023 \frac{\text{кПа}}{\text{рад/с}}$$

По структурной схеме рисунка 4.26 в программной среде Simulink в системе MathLab составлена имитационная модель показанная на рисунке 4.29. В состав имитационной модели на рисунке 4.29 входят кроме приведенных выше моделей блоков РЭП дополнительные суперблоки:

- регулятор соотношения топливо/воздух (рисунок 4.30);
- блок формирования задающих воздействий (рисунок 4.31).

### ***Расчетные параметры настройки контура регулирования давления воздуха***

Структурная схема контура регулирования давления воздуха приведена на рисунке 4.28.

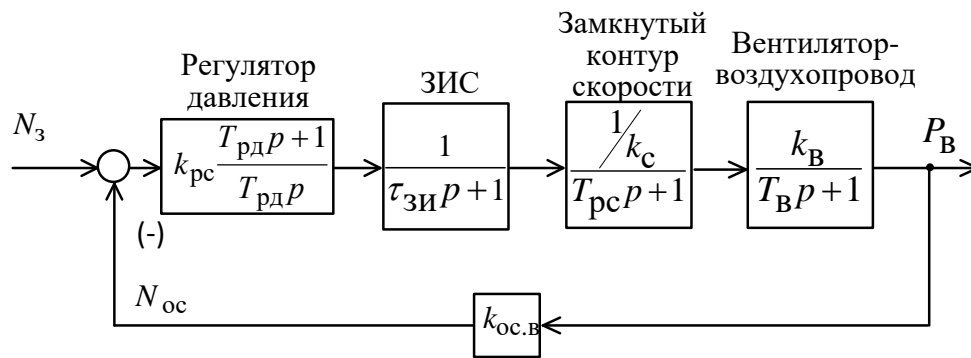


Рисунок 4.28.— Структурная схема контура регулирования давления воздуха

Внутренний оптимизированный замкнутый контур скорости с ПИ-регулятором представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{с.зам}} \approx \frac{1/k_{\text{с}}}{T_{\text{рс}} \cdot p + 1},$$

Передаточная функция ПИ-регулятора соотношения топливо/воздух:

$$W(p)_{\text{рд}} = k_{\text{рд}} \cdot \frac{T_{\text{рд}}p + 1}{T_{\text{рд}} \cdot p},$$

где  $T_{\text{рд}} = T_{\text{в}} = 2$  с – постоянная времени регулятора.

Передаточная функция системы «вентилятор – воздухопровод» представлена в виде апериодического звена первого порядка

$$W(p)_{\text{в}} = \frac{k_{\text{в}}}{T_{\text{в}}p + 1},$$

где  $k_{\text{в}} = k_{\text{вср}}$  – коэффициент передачи звена.

Передаточная функция разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{в.раз}} = \frac{k_{\text{ос.в}} \cdot (T_{\text{рд}}p + 1) \cdot k_{\text{в}}}{T_{\text{рд}}p (\tau_{\text{зи}}p + 1) \cdot k_{\text{с}} \cdot T_{\text{в}}p + 1},$$

где  $k_{\text{ос.в}} = 1$  – коэффициент обратной связи,  $\tau_{\text{зи}} = \frac{T_{\text{зи}}}{3 \div 4}$ .

Передаточная функция замкнутого контура



$$W(p)_{\text{в.зам}} = \frac{W(p)_{\text{в.раз}}}{1 + W(p)_{\text{в.раз}} \cdot k_{\text{ос.в}} + 1} = \frac{1}{\frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{рд}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot T_{\text{в}} p (\tau_{\text{зи}} p + 1) \cdot (T_{\text{рс}} p + 1) + 1} =$$

$$= \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1},$$

$$\text{где } a_3 = \frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{рд}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot T_{\text{в}} \tau_{\text{зи}} T_{\text{рс}};$$

$$a_2 = \frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{рд}} \cdot k_{\text{в}}} (T_{\text{в}} T_{\text{рс}} + T_{\text{в}} \tau_{\text{зи}}) = \frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{рд}} \cdot k_{\text{в}}} T_{\text{в}} (T_{\text{рс}} + \tau_{\text{зи}});$$

$$a_1 = \frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{рд}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot T_{\text{в}}.$$

Ограничиваемся 2-м порядком, тогда условие настройки контура на модульный оптимум:  $a_1^2 = 2 \cdot a_2$ ;

$$\left( \frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{рд}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot T_{\text{в}} \right)^2 = 2 \frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{рд}} \cdot k_{\text{в}}} T_{\text{в}} (T_{\text{рс}} + \tau_{\text{зи}});$$

$$\frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{рд}} \cdot k_{\text{в}}} \cdot T_{\text{в}} = 2 (T_{\text{рс}} + \tau_{\text{зи}}),$$

откуда коэффициент передачи регулятора

$$k_{\text{рд}} = \frac{T_{\text{в}} \cdot k_{\text{с}}}{k_{\text{в}} \cdot 2 \cdot T_{\mu\text{э}}} = \frac{2 \cdot 0,0065}{0,023 \cdot 2 \cdot 1} = 0,28,$$

$$\text{где } T_{\mu\text{э}} = T_{\text{рс}} + \tau_{\text{зи}} = 1 + 3,2 \cdot 10^{-3} \approx 1 \text{ с},$$

### ***Результаты имитационных исследований САР давления воздуха перед горелкой***

Полный имитационный цикл работы показан на рисунке 4.32.

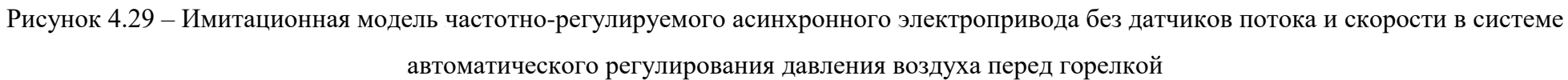
Зона А – Б соответствует пуску двигателя на минимальную рабочую скорость и создание пускового давления перед горелкой не ниже уставки предупредительной сигнализации 0,15кПа. Значение пускового давления воздуха выбирается при наладке.

Зона Б – В соответствует включению регулятора давления воздуха и установлению рабочих значений параметров системы.

Зона В – Г соответствует рабочему режиму регулирования давления воздуха перед горелкой.

Анализ приведенных графиков доказывает работоспособность разработанного частотно-регулируемого электропривода в составе технологического контура регулирования давления воздуха перед горелкой.

На рисунке 4.33 приведены графики переходных процессов давления топлива и давления воздуха.



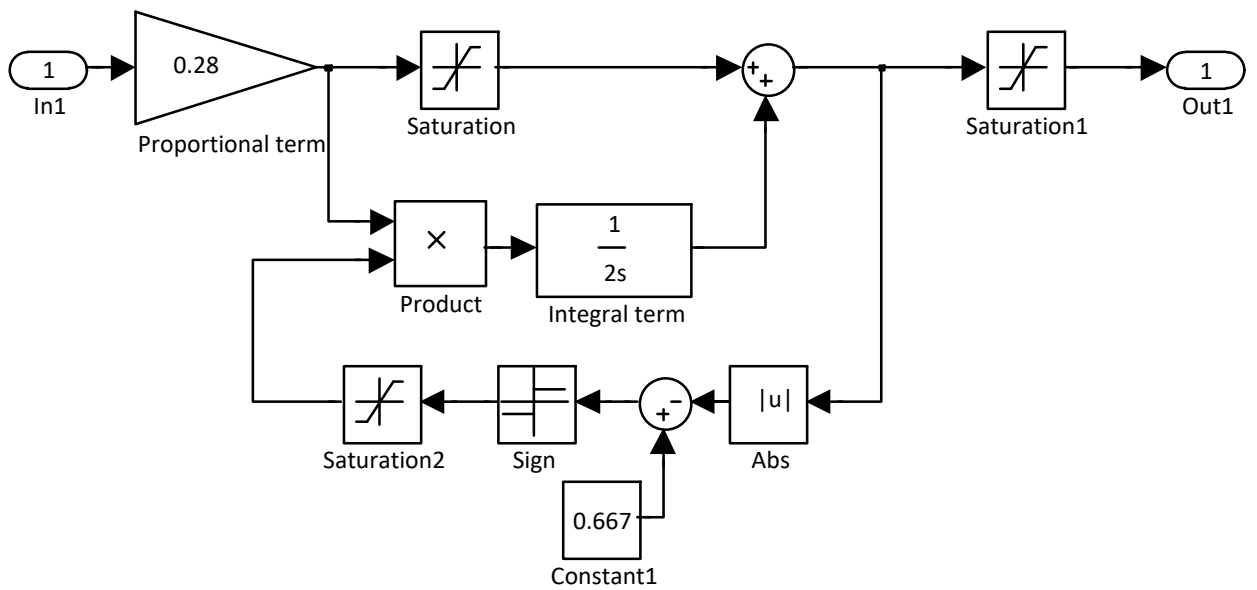


Рисунок 4.30 – Имитационная модель ПИ-регулятора соотношения топлива/воздух

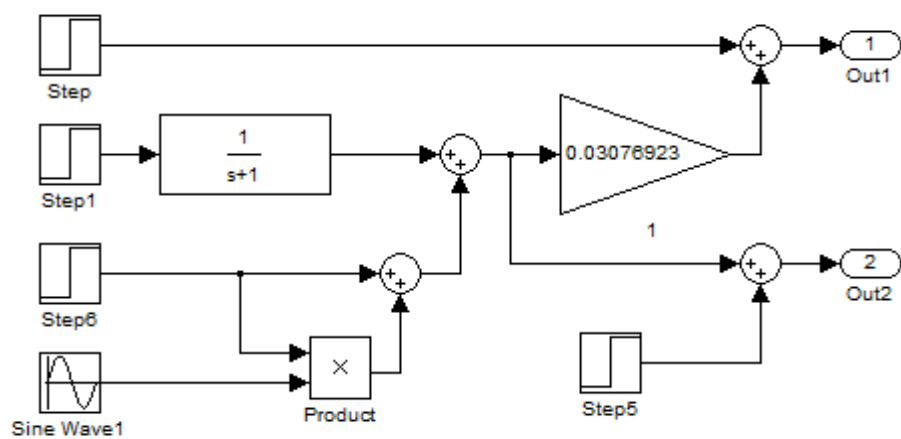


Рисунок 4.31 – Имитационная модель блока формирования задающих воздействий

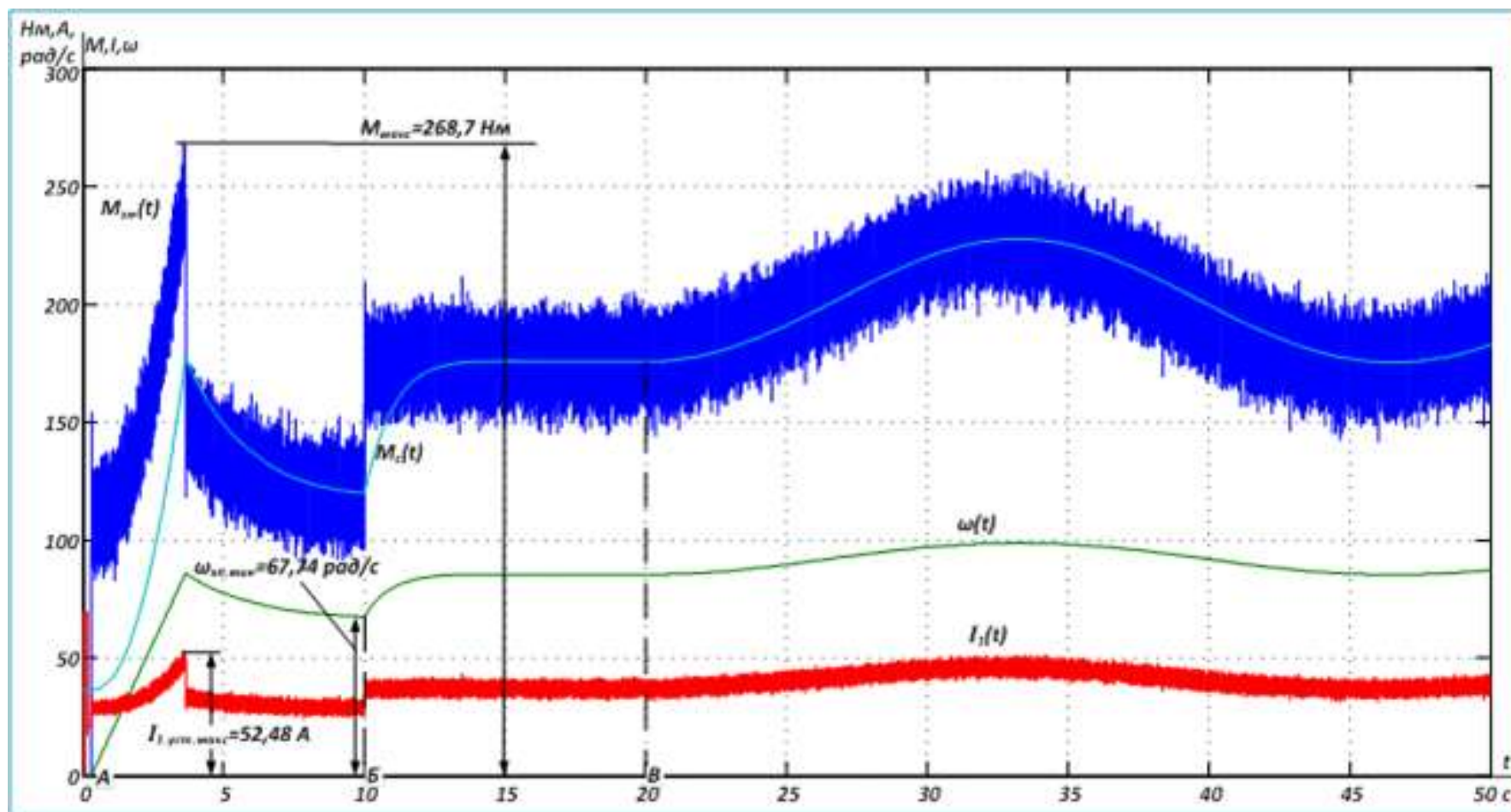


Рисунок 4.32 – Полный цикл работы: А-Б Разгон до минимальной рабочей скорости, Б-В включение регулятора давления воздуха, В-Г процесс регулирования частоты вращения вентилятора

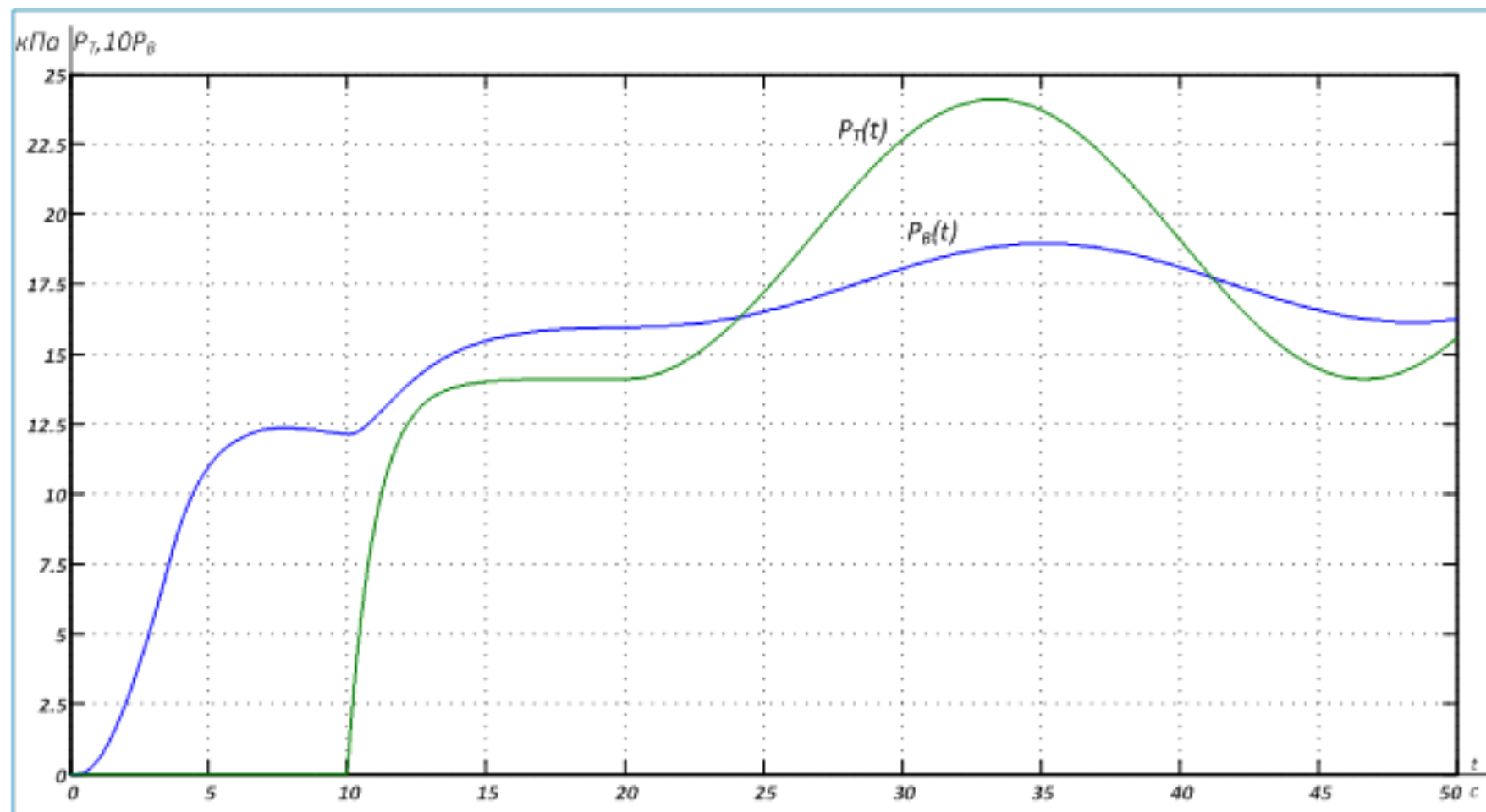


Рисунок 4.33 – Переходные процессы давления топлива и давления воздуха

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г5А1	Ястребов Роман Олегович

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение	Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов инженерного проекта(ИП): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием производства..
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решений ИП	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИП	Структура работ; Определение трудоемкости; Разработка графика проведения исследования
3. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	Расчет бюджетной стоимости ИП по разработке стенда
4. Оценка ресурсной эффективности ИП	Расчет интегрального критерия: Интегральный финансовый показатель разработки; Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки; Интегральный показатель эффективности; Сравнительная эффективность вариантов исполнения

### Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности ИП
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Инвестиционный план. Бюджет ИП
5. Основные показатели эффективности ИП

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н. Доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Ястребов Роман Олегович		

## **5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Важнейшим фактором успешного функционирования любого промышленного предприятия, в рамках жесткой конкуренции с отечественными и иностранными производителями, является постоянное совершенствование технологии и продукции. Новые технологии и модернизация — это необходимый фактор для успешного продвижения продукции. Современный рынок требует от отечественного производителя коренной реконструкции и модернизации устаревшего технологического оборудования. Совершенствование технологий производства с целью повышения качества продукции, экономии затраченных средств, внедрение новых идей и соответственно появление новых видов продукции с новыми качествами - все это в условиях свободной конкуренции на рынке требует от товаропроизводителя совершенствовать и внедрять новое технологическое оборудование.

Данный раздел выпускной квалификационной работы посвящен выбору наиболее выгодного варианта электропривода для рассматриваемого объекта автоматизации. В данном проекте рассматривается частотно-регулируемый асинхронный электропривод. Преимуществами такого вида электропривода по сравнению с электроприводами постоянного тока являются:

- более низкая стоимость;
- минимальные затраты на обслуживание;
- обеспечение требуемой степени защиты.

Асинхронные короткозамкнутые машины имеют широкий ряд исполнений с разными степенями защиты. Это важно для рассматриваемого применения, так как оно связано с применением в помещении с высокой влажностью в окружающей среде и требует степени защиты электрических машин не ниже IP44.

В данном разделе будут рассмотрены следующие аспекты:



- Оценка коммерческого потенциала внедрения данной методики;
- Планирование инженерного проекта;
- Расчет бюджета инженерного проекта;
- Определение ресурсной эффективности проекта.

### **5.1 Анализ конкурентных технических решений**

Анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности проекта и определить направления для ее будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в табл. 5.1. Для этого необходимо отобрать не менее трех-четырех конкурентных товаров и разработок. В качестве конкурентных товаров были рассмотрены электроприводы (Б<sub>ф</sub> - 5A200L6, Б<sub>К1</sub> - 5AM132M6У3, Б<sub>К2</sub> - 5AM112M2У3) Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 5.1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Таблица 5.1 - Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособности		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,07	4	3	2	0,28	0,21	0,14
3. Энергоэкономичность	0,12	5	4	4	0,6	0,48	0,48
4. Надежность	0,2	4	4	4	0,8	0,8	0,8
5. Уровень шума	0,05	3	4	4	0,15	0,2	0,2
6. Безопасность	0,08	4	2	2	0,32	0,16	0,16
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,04	4	3	3	0,16	0,12	0,12
2. Цена	0,16	4	5	3	0,64	0,8	0,48
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,13	5	5	3	0,65	0,65	0,39
4. Послепродажное обслуживание	0,05	3	4	1	0,15	0,2	0,05
<b>Итого</b>	<b>1</b>				4,25	3,92	3,22

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B<sub>i</sub> – вес показателя (в долях единицы);

B<sub>i</sub> – балл i-го показателя.

Итогом данного анализа является определение конкурентных преимуществ, которые отличающихся высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров. Из данного анализа видно, что наиболее перспективен электропривод *5A200L6*.

## **5.2 SWOT анализ**

SWOT расшифровывается как: Strengths – сильные стороны, Weakness – слабые стороны, Opportunities – возможности, Threats – угрозы.

SWOT анализ-представляет собой комплексный анализ стратегического планирования. С помощью SWOT анализа можно провести исследование сильных и слабых сторон внутренней и внешней сред проекта.

Как правило проведения SWOT анализа производится в три этапа.

Первый этап описывает сильные и слабые стороны проекта. Описание производится путем составления предварительной SWOT матрицы.

На втором этапе выявляется соответствие сильных и слабых сторон проекта. Эти соответствия должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

На третьем этапе составляется итоговая матрица SWOT-анализа.

Таблица 5.2 – SWOT анализ

	<p><b>Strengths (сильные стороны)</b></p> <p>S1. Техническая простота реализации проекта;</p> <p>S2. Экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>S3. Значительно низкая цена по сравнению с европейскими комплектными приводами</p> <p>S4. Возможность реализации проекта не более чем двумя участниками</p> <p>S5. Высокий срок эксплуатации.</p> <p>S6. Универсальность технологии в применении</p> <p>S7. Пониженные вибро-шумовые характеристики</p>	<p><b>Weaknesses (слабые стороны)</b></p> <p>W1. Значительная стоимость оборудования.</p> <p>W2. Повышенная аварийность по сравнению с не регулируемым электроприводом.</p> <p>W3. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по ТО оборудования.</p> <p>W4. Повышенные требования к качеству электроэнергии.</p>
<p><b>Opportunities (возможности)</b></p> <p>O1. Экономия электроэнергии за счет использования преобразователя частоты.</p> <p>O2. Увеличение срока эксплуатации электродвигателя за счет снижения частоты вращения.</p> <p>O3. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>O4. Повышение стоимости импортного оборудования за счет снижения курса пары рубль/доллар США; рубль/евро.</p> <p>O5. Использование отечественных комплектующих.</p>		
<p><b>Threats (угрозы)</b></p> <p>T1. Незаинтересованность крупных теплогенерирующих компаний.</p> <p>T2. Отказ привода при снижении качества электроэнергии</p> <p>T3. Развитие отечественных конкурентных разработок</p> <p>T4. Введение дополнительных требований по повышению надежности электропривода котловых установок со стороны государственной инспекции</p>		

Таблица 5.3 – Связь сильных сторон с возможностями

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
O1	-	+	-	-	-	-	-
O2	-	-	-	-	+	-	+
O3	+	-	-	-	-	-	-
O4	-	-	+	-	-	-	-
O5	-	-	+	+	-	+	-

Таблица 5.4 – Связь слабых сторон с возможностями

	W1	W2	W 3	W4
O1	+	-	-	-
O2	+	-	-	-
O3	-	-	-	-
O4	+	-	-	
O5	+	-	+	+

Таблица 5.5 – Связь сильных сторон с угрозами

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
T1	-	-	-	-	-	-	-
T2	+	-	-	-	-	-	-
T3	-	-	-	-	-	-	-
T4	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 5.6 – Связь слабых сторон с угрозами

	W1	W2	W 3	W4
T1	-	-	-	-
T2	+	+	-	-
T3	+	-	-	-
T4	-	+	+	+

Таблица 5.7 –Итоговая SWOT матрица

	<b>Strengths (сильные стороны)</b>	<b>Weaknesses (слабые стороны)</b>
	<p>S1. Техническая простота реализации проекта;</p> <p>S2. Экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>S3. Значительно низкая цена по сравнению с европейскими комплектными приводами</p> <p>S4. Возможность реализации проекта не более чем двумя участниками</p> <p>S5. Высокий срок эксплуатации.</p> <p>S6. Универсальность технологии в применении</p> <p>S7. Пониженные вибро-шумовые характеристики</p>	<p>W1. Значительная стоимость оборудования.</p> <p>W2. Повышенная аварийность по сравнению с не регулируемым электроприводом.</p> <p>W3. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по ТО оборудования.</p> <p>W4. Повышенные требования к качеству электроэнергии.</p>
<p><b>Opportunities (возможности)</b></p> <p>O1. Экономия электроэнергии за счет использования преобразователя частоты.</p> <p>O2. Увеличение срока эксплуатации электродвигателя за счет снижения частоты вращения.</p> <p>O3. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>O4. Повышение стоимости импортного оборудования за счет снижения курса пары рубль/доллар США; рубль/евро.</p> <p>O5. Использование отечественных комплектующих.</p>	<p>O1 S2</p> <p>O2 S5,S7</p> <p>O3 S1</p> <p>O4 S3</p> <p>O5 S3,S4,S6</p>	<p>O1 W1</p> <p>O2 W1</p> <p>O4 W1</p> <p>O5 W1,W3,W4</p>
<p><b>Threats (угрозы)</b></p> <p>T1. Незаинтересованность крупных теплогенерирующих компаний.</p> <p>T2. Отказ привода при снижении качества электроэнергии</p> <p>T3. Развитие отечественных конкурентных разработок</p> <p>T4. Введение дополнительных требований по повышению надежности электропривода котловых установок со стороны государственной инспекции</p>	<p>S1 T2</p>	<p>T2 W1,W2</p> <p>T3 W1</p> <p>T4 W2,W3,W4</p>

SWOT анализ показывает, что данная система является перспективной, являясь простой и в то же время высокоэнергоэффективной, а так же конкурентоспособной на отечественном рынке. Недостатками системы являются: высокая по сравнению с нерегулируемым электроприводом аварийность, вызванная низким качеством электроэнергии, а так же увеличивающаяся конкуренция, ввиду активного развития данного направления в настоящее время.

### 5.3 Планирование ИП

Для выполнения данного проекта необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят руководитель и инженер. Для каждой из запланированных работ, необходимо выбрать исполнителя этой работы.

Разработанный список задач и производимых работ, в рамках проектирования, а также распределение исполнителей по этим работам, представлен в виде таблицы.

Трудоемкость характеризуется количеством живого труда, затраченного на изготовление какой-либо продукции. Все этапы работы и значения трудоемкости занесены в план-график, таблица 5.8.

Таблица 5.8- Этапы и содержание ИП

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
1. Разработка технического задания	1.1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
2. Разработка плана работ	2.1.	Технико-экономическое обоснование проекта, разработка плана работ	Руководитель Инженер
3. Расчет параметров, выбор двигателя и ПЧ	3.1.	Описание объекта автоматизации	Инженер
	3.2.	Проработка кинематической схемы	Инженер
	3.3.	Разработка структурной схемы ЭП	Инженер
		Расчет мощности и выбор электродвигателя	Инженер
	3.4.	Выбор способа регулирования скорости	Инженер
	3.5.	Расчет предельных характеристик системы «ПЧ-АД»	Инженер
4. Моделирование работы привода	4.1.	Разработка программы исследований модели	Руководитель, инженер

	4.2.	Создание имитационной модели в среде Simulink программы Matlab	Инженер
	4.3.	Исследование нелинейной САУ СЭП асинхронного привода с векторным управлением	Инженер
	4.4.	Исследование нелинейной САУ СЭП в заданных режимах работы	Инженер
	4.5.	Исследование двухмассовой системы САУ СЭП	Инженер
5. Обобщение и оценка результатов	5.1	Оценка результатов.	Руководитель, инженер

### 5.3.1 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула, на примере задачи «Выбор способа регулирования скорости»:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4, \quad (3)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного



расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} = \frac{1,4}{1} = 1,4, \quad (4)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

### 5.3.2 Разработка графика реализации ИП

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

**Диаграмма Ганта** – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, с расчетом для «Выбор способа регулирования скорости» для инженера :

$$T_{ki.рук} = T_{pi} \cdot k_{кал}$$

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал} = 1,4 \cdot 1,47 = 2,058 \approx 2, \quad (5)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по формуле:

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней.

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 52 - 15} = 1,224 \approx 1,22,$$

$$k_{\text{кал.инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 103 - 15} = 1,4758 \approx 1,47 \quad (6)$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения необходимо свести в таблицу (табл. 5.8).

Таблица 5.8 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Исполнители	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$		Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$	
		$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожі}$ , чел-дни					
		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
1. Разработка ТЗ на проектирование	Р	1	–	2	–	1,4	–	1,4	–	2	–
2. Разработка плана работ и технико-экономическое обоснование проекта	Р, И	3	4	4	5	3,4	4,4	1,7	2,2	2	3
3. Описание объекта автоматизации (модернизации)	Р, И	4	5	5	6	4,4	5,4	2,2	3,7	3	5
4. Кинематическая схема механизма	И	–	2	–	5	–	3,2	–	3,2	–	5
5. Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	И	–	4	–	5	–	4,4	–	4,4	–	6
6. Расчет мощности и выбор электродвигателя	И	–	1	–	3	–	1,8	–	1,8	–	3
7. Выбор способа регулирования скорости	И	–	1	–	2	–	1,4	–	1,4	–	2
8. Расчет предельных характеристик системы «преобразователь–электродвигатель»	И	–	5	–	6	–	5,4	–	5,4	–	8

9. Разработка математической модели системы АУ ЭП	И	–	8	–	10	–	8,8	–	8,8	–	13
10. Оптимизация САР электропривода	И	–	5	–	7	–	5,8	–	5,8	–	9
11. Разработка программы имитационного моделирования	Р, И	5	5	6	7	5,4	5,8	2,7	2,9	3	4
12. Вопросы безопасности и экологичности проекта	И	–	2	–	4	–	2,8	–	2,8	–	4
13. Техничко-экономические расчеты	И	–	5	–	7	–	5,8	–	5,8	–	8
14. Составление пояснительной записки	И	–	7	–	9	–	7,8	–	7,8	–	11
15. Разработка графического сопровождения проекта	И	–	3	–	5	–	3,8	–	3,8	–	6
16. Сдача проекта	И	–	1	–	2	–	1,8	–	1,8	–	3

На основе табл. 5.8 строится календарный план-график (Рисунок 1). График строится в рамках инженерного проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования.

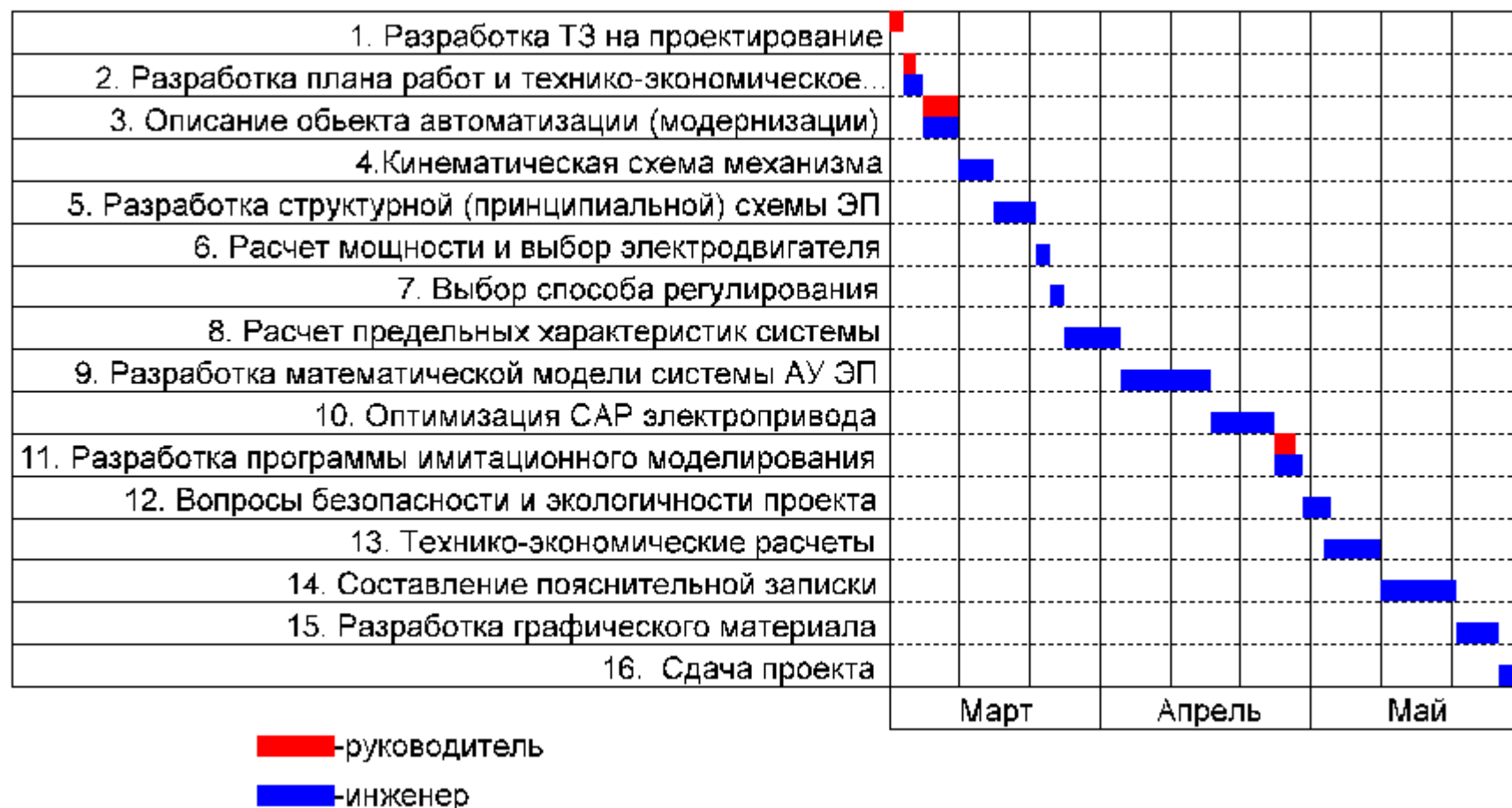


Рисунок 5.1 - Календарный план-график

Таблица 5.9– Сводная таблица по календарным дням и часам

	Количество дней	Трудо- затраты, час.
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	88	704
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	10	80
Общее количество календарных дней для выполнения работы	98	784

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

### **5.3.3 Бюджет исследовательской работы**

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

### **5.3.4 Материальные затраты ИП**

Данная статья включает затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 5.10.

Таблица 5.10 – Сырье, материалы и комплектующие изделия

Наименование	Кол- во	Цена, руб	Общая стоимость, руб
Электродвигатель 5A200L6	1	41080	41080
Преобразователь частоты серии ИРБИ 8ХЗ, фирмы ИРБИС	1	16800	16800
Шкаф электрический	1	7650	7650
Выключатель автоматический однополюсный IEK С ВА47-29 16 А	1	350	350
Кнопка управления	2	200	400
Лампа индикации	2	150	300
Колодка клеммная	3	120	360
Провод силовой ВВГ(НГ)LS4x4	5 м	130	650
Итого:			67590

### 5.3.5 Специальное оборудование

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Таблица 5.11 – Специальное оборудование для монтажных и наладочных работ

Наименование оборудования	Количество единиц, шт.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Перфоратор электрический	1	6000	6000
Дрель электрическая	1	4000	4000
Инструмент с изолированной рукоятью(набор)	1	2750	2750
Мультиметр МУ64С	1	5910	5910
Итого		17940	



Таким образом затраты на монтажные и наладочные работы составили 85530 рублей.

### 5.3.6 Расчет амортизации специального оборудования

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

Таблица 5.12 – Специальное оборудование для экспериментальных работ

Наименование оборудования	Количество единиц, шт.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Компьютер	1	45000	45000
Осциллограф Tektronix TDS 1012B	1	60000	60000
Итого		105000	

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m,$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $m$  – время использования, мес.

Рассчитаем амортизацию для компьютера, с учётом, что срок полезного использования 8 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{8} = 0,125.$$

Рассчитаем амортизацию для осциллографа, с учётом, что срок полезного использования 10 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{10} = 0,1.$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

Компьютер:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m = \frac{0,125 \cdot 40000}{12} \cdot 3 = 1250 \text{ руб.}$$

Осциллограф:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m = \frac{0,1 \cdot 60000}{12} \cdot 3 = 1500 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 1250 + 1500 = 2750 \text{ руб.}$$

### 5.3.7 Основная заработная плата

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_o) k_p = 29000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 56550 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_o) k_p = 18500 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 36075 \text{ руб.},$$

где  $Z_{mc}$  – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;  $k_{np}$  – премиальный коэффициент, равен 0,3;  $k_o$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;  $k_p$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{он} = \frac{Z_m \cdot M}{F_o} = \frac{56550 \cdot 10,4}{243} = 2420,2 \text{ руб.},$$

где  $Z_m$  – должностной оклад работника за месяц;  $F_o$  – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн. (табл. 5.13);  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

- при отпуске в 28 раб. дня –  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней –  $M = 10,3$  месяца, 6-дневная рабочая неделя;

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{он}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{о}}} = \frac{37075 \cdot 11,2}{213} = 1896,9 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата  $Z_{\text{осн}}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{он}} \cdot T_{\text{р}},$$

где  $Z_{\text{он}}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн.

Таблица 5.13 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	103
- праздничные дни	15	15
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	24
- невыходы по болезни	8	11
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	213

Таблица 5.14 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{\text{мс}}, \text{руб}$	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{о}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}, \text{руб}$	$Z_{\text{он}}, \text{руб}$	$T_{\text{р}}, \text{раб.дн.}$	$Z_{\text{осн}}, \text{руб}$
Руководитель	29000	0,3	0,2	1,3	56550	2420,2	10	24202
Инженер	18500	0,3	0,2	1,3	36075	1896,9	88	166927,2
Итого:								191129,2

### Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,14 \cdot 24202 = 3388,3 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,14 \cdot 166927,2 = 23369,8 \text{ руб.},$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,14).

Таблица 5.15 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	Дополнительная заработная плата
Руководитель	3388,3
Инженер	23369,8
Итого	26,758,1

### 5.3.8 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (24202 + 3388,3) = 8277,1 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (166927,2 + 23369,8) = 57089,1 \text{ руб.},$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

Таблица 5.16 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	Отчисления во внебюджетные фонды
Руководитель	8277,1
Инженер	57089,1
Итого	65366,2

### 5.3.9 Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, такие как: печать и ксерокопирование проектировочных документов, оплата услуг связи.

Накладные расходы в целом:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 6) \cdot k_{\text{нр}} = \\ = (67590 + 17940 + 2750 + 191129,2 + 26758,1 + 65366,2) \cdot 0,16 = 59445,4 \text{ руб.},$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 16%.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НТИ (название темы) по форме, приведенной в таблице 5.17.

Таблица 5.17 – Группировка затрат по статьям

Статьи								
Сырье, материалы	Специальное оборудование	Амортизация	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
67590	17940	2750	191129,2	26758,1	65366	371533,5	59445,4	430978,7

#### 5.4 Определение ресурсоэффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги:

1. Регулируемый электропривод состоящий из электродвигателя 5AM132M6У3 и преобразователя частоты Danfoss.
2. Регулируемый электропривод состоящий из электродвигателя 5AM112M2У3 и преобразователя частоты Веспер.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп. } i} = \frac{\Phi_{\text{пр}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{224438,3}{330000} = 0,68,$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{430978,7}{515000} = 0,83;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{515000}{515000} = 1;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}3} = \frac{\Phi_{p3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{394500}{515000} = 0,77.$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

### **Интегральный показатель ресурсоэффективности**

В данном разделе необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;  $a_i$  – весовой коэффициент проекта;  $b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 5.18.

Таблица 5.18 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Вес критерия	Баллы		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	3	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,07	4	3	2
3. Энергоэффективность	0,12	5	4	4
4. Надежность	0,2	4	4	4
5. Уровень шума	0,05	3	4	4
6. Безопасность	0,08	4	2	2
7. Конкурентоспособность продукта	0,04	4	3	3
8. Цена	0,16	4	5	3
9. Предполагаемый срок эксплуатации	0,13	5	5	3
10. Послепродажное обслуживание	0,05	3	4	1
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>4,25</b>	<b>3,92</b>	<b>3,22</b>

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,1 \cdot 5 + 0,07 \cdot 4 + 0,12 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,05 \cdot 3 + 0,08 \cdot 4 + 0,04 \cdot 4 + 0,16 \cdot 4 + 0,13 \cdot 5 + 0,05 \cdot 3 = 4,25$$

$$I_{p2} = 0,1 \cdot 3 + 0,07 \cdot 3 + 0,12 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,05 \cdot 4 + 0,08 \cdot 2 + 0,04 \cdot 3 + 0,16 \cdot 5 + 0,13 \cdot 5 + 0,05 \cdot 4 = 3,92$$

$$I_{p3} = 0,1 \cdot 4 + 0,07 \cdot 2 + 0,12 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,05 \cdot 4 + 0,08 \cdot 2 + 0,04 \cdot 3 + 0,16 \cdot 3 + 0,13 \cdot 3 + 0,05 \cdot 1 = 3,22$$

**Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки** определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп.1}}{I_{финп}} = \frac{4,25}{0,83} = 5,12;$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (табл. 5.19). Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{cp}$ ):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} = \frac{4,4}{6,25} = 0,7.$$

Таблица 5.19 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,83	1	0,77
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,25	3,92	3,22
3	Интегральный показатель эффективности	5,12	3,92	4,18
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,76	0,81

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации устройства, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;
2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 90 дней, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 88 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель - 10;
3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 430978,7 руб;



4. По факту оценки эффективности ИР, можно сделать выводы:

- Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,83, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;
- Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,25, по сравнению с 3,92 и 3,22;
- Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 5,12, по сравнению с 3,92 и 4,18, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г5А1	Ястребов Роман Олегович

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение	Электроэнергети-ка и электротехника
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергети-ка и электротехника

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Частотно регулируемый электропривод вентилятора котла БЭМ-25/4,0-380Г, применяемый для поддержания оптимального давления воздуха в камере сжигание топлива.
--	---

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	ГОСТ 12.1.019-79, Федеральный закон №181-ФЗ «Об основах охраны труда в Российской Федерации », ПТЭЭП Глава 1.4. «Требования к персоналу и его подготовка»
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<i>Вредными факторами являются:</i> 1. Отклонение показателей микроклимата 2. Повышенный уровень шума 3. Повышенный уровень вибрации <i>Опасными факторами являются:</i> 1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека 2. Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	- Загрязнение окружающей среды отходящими газами. - По истечению срока службы проведение мероприятий по утилизации.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: -Пожар -Взрыв Типичная ЧС: -Пожар

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Ястребов Роман Олегович		

## **6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

Целью данного раздела является анализ вредных и опасных факторов труда работников котельной, где будет внедрен электропривод, разработка мер защиты от этих факторов, оценка условий труда и микроклимата рабочей среды. Кроме того, в разделе рассматриваются вопросы техники безопасности, пожарной профилактики и охраны окружающей среды, даются рекомендации по созданию оптимальных условий труда.

В данной квалификационной работе разработан регулируемый электропривод вентилятора котла БЭМ-25/4,0-380Г.

Электропривод представляет собой комплекс, в состав которого входит асинхронный электродвигатель 5А200L6 устанавливаемый на котле для поддержания постоянного оптимального давления в топочной камере котла, преобразователя частоты ИРБИС-предназначенного для пуска, останова, а также для регулирования частоты вращения электродвигателя.

### **6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **6.1.1 Требования, предъявляемые к персоналу**

К работе в электроустановках допускаются лица, достигшие возраста восемнадцати лет. Работники, принимаемые для выполнения работ, должны иметь профессиональную подготовку, соответствующую характеру работы. Профессиональная подготовка персонала, повышение его квалификации, проверка знаний и инструктажи проводятся в соответствии с требованиями государственных и отраслевых нормативных правовых актов по организации охраны труда и безопасной работе персонала.

Проверка состояния здоровья работника проводится до приема его на работу, а также периодически, в порядке, предусмотренном Минздравом России.

### **6.1.2 Требования, предъявляемые к рабочему месту**

Согласно ПУЭ и ПТЭЭП электроустановки должны находиться в технически исправном состоянии, обеспечивающем безопасные условия труда.

Электроустановки должны быть укомплектованы испытанными, готовыми к использованию защитными средствами, а также средствами оказания первой медицинской помощи в соответствии с действующими правилами и нормами.

Организационными мероприятиями, обеспечивающими безопасность работ в электроустановках, являются:

- оформление работ нарядом, распоряжением или перечнем работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации;
- выдача разрешения на подготовку рабочего места и на допуск к работе с учетом требований пункта 5.14 Правил;
- допуск к работе;
- надзор во время работы;
- оформление перерыва в работе, перевода на другое место, окончания работы.

### **6.1.2 Трудовой распорядок и оплата труда**

Режим работы на предприятии 4-х сменный, продолжительность одной смены 12 часов. Все работники котельной застрахованы в соответствии с коллективным договором. Тарифная ставка в ночное время на 40% больше дневной смены. Смены в праздничные дни оплачиваются по двойной тарифной ставке.

Оплата больничного листа 100%. Оплата труда начисляется 25 числа-аванс, и 10 числа-зарплата. Продолжительность ежегодного отпуска для электротехнического персонала составляет 24 календарных дня.

### 6.2.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов.

Рабочей зоне котельной присущи следующие вредные и опасные производственные факторы:

Таблица 6.1- Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разра- ботка	Изготов	Эксплу	
1. Поражения электрическим током			+	ГОСТ ИЕС 61140-2012 Защита от поражения электрическим током.
2. Подвижные части производственного оборудования			+	ПУЭ: Глава 5.3. Электродвигатели и их коммутационные аппараты
3. Отклонение показателей микроклимата			+	СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
4. Превышение уровня шума			+	СН 2.2.4/2.1.8.562-96 "Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки"
5. Повышенный уровень общей вибрации			+	СН 2.2.4/2.1.8.556-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий»

## **6.2.2 Опасные производственные факторы:**

### **Поражения электрическим током**

Опасность поражения электрическим током на котельной исходит от электрооборудования, работающего на напряжении 220/400 В переменного тока промышленной частоты 50Гц.

Проходя через тело человека, электрический ток оказывает следующие действия:

- Термическое
- Электролитическое
- Механическое
- Биологическое

Для исключения поражения человека электрическим током при ремонте электропривода должны соблюдаться следующие правила:

- Ремонт производить с соблюдением требований ПТЭЭП;
- Электрооборудование должно соответствовать требованиям ПУЭ

### **Подвижные части производственного оборудования**

Источником опасности являются вращающиеся части электродвигателя (ротор) и приводимое им оборудование.

Фактор оказывает физическое (механическое) воздействие на человека, приводящее как к смертельным, та и не смертельным травмам.

Для защиты человека от контакта с вращающимися частями электродвигателя, согласно ПУЭ глава 5.3.6. вращающиеся части электродвигателей и части, соединяющие электродвигатели с механизмами имеют ограждения от случайных прикосновений.

## **6.2.3 Вредные производственные факторы**

### **Отклонение показателей микроклимата**

Нормы производственного микроклимата установлены системой стандартов безопасности труда СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений». Показателями, характеризующими микроклимат, являются:

- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового излучения.

Отклонение показателей микроклимата приводит к нарушению терморегуляции организма, и как следствие быстрой утомляемости человека, снижению концентрации внимания, потере жидкости, дисбалансу солей.

По степени физической тяжести работа персонала относится к категории тяжелых работ. В основном все метрологические параметры цеха удовлетворяют требуемым нормам СанПиН 2.2.4.548-96 (таблица 6.2). Так, в холодный период года температура в котельной составляет 18 °С, влажность = 65%, скорость движения воздушных масс = 0,4м/с. В теплый период года температура = 22°С, влажность составляет 45%, скорость движения воздушных масс = 0,3м/с.

Таблица 6.2 – Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ	Температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая
Холодный	Тяжелая - III	16-18	13-21	40–60	<75	< 0,3	< 0,5
Теплый		18-20	15-26		<75 (при 24°С)		
						< 0,4	0,2-0,6

Для создания нормальных метеорологических условий принимаются следующие меры:

- теплоизоляция и экранизация источников излучения.
- искусственная вентиляция помещений (приточная, вытяжная)

### **Превышение уровня шума**

Используемые в производстве разнообразные машины, аппараты и механизмы-агрегаты динамически неуравновешенными, что приводит к появлению шума. Длительное систематическое воздействие шума на организм человека приводит к следующим негативным последствиям:

- снижает производительность труда в следствии повышения утомляемости;
- снижает чувствительность слуха;

Для оценки уровня шума допускается в качестве характеристики постоянного широкополосного шума на рабочих местах принимать уровень звука значение которого приведено в ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ «Шум. Общие требования безопасности».

Согласно, СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Параметры шума на рабочих местах» допустимый уровень звукового давления для цеха составляет 80 дБ со среднегеометрической частотой 1000 Гц и уровень звука 80 дБ. В механических устройствах часто причинами не допустимого шума являются износ подшипников, неточная сборка деталей при ремонтах и т. п. Поэтому в процессе эксплуатации всех видов машин и механизмов следует точно выполнять все требования Правил технической эксплуатации. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. «Средства и методы защиты от шума. Квалификация». предусматривает следующие меры для снижения уровня шума:

- устройство кратковременных перерывов в работе.
- установка в помещениях звукопоглощающих конструкций и экранов.
- применение средств индивидуальной защиты (беруши, противошумные наушники и др.).



## Повышенный уровень вибрации

Основными источниками вибрации в помещении котельной являются электродвигатели и приводимые ими насосы и вентиляторы.

Воздействие общей производственной вибрации на человека вызывает изменения как физиологического, так и функционального состояния организма человека. Изменения в функциональном состоянии организма проявляются в повышении утомляемости, увеличении времени двигательной и зрительной реакции, нарушении вестибулярных реакций и координации движений. Все это ведет к снижению производительности труда.

Гигиеническое нормирование вибраций регламентирует параметры производственной вибрации и правила работы с виброопасными механизмами и оборудованием СН 2.2.4/2.1.8.556-96 «Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий» .

В основном все предельно допустимые значения вибрации удовлетворяют требуемым нормам СанПиН 2.2.4.548-96 (таблица 6.3). Так, значения виброскорости и виброускорения не превышают 75 дБ для наибольших среднегеометрических частот 32,5-63 Гц.

Таблица 6.3 – Предельно допустимые значения вибрации рабочих мест

Вид вибрации: Технологическая	Среднегеометрические частоты, Гц					
	2	4	8	16	32,5	63
Предельно допустимые значения виброскорости, дБ	108	99	93	92	92	92
Предельно допустимые значения виброускорения, дБ	103	100	100	106	112	110

Для снижения уровня вибрации производится замена изношенных частей установки, виброизоляция, применение виброгасителей, применение средств индивидуальной защиты: рукавицы с прокладкой на ладонной поверхности и обувь на толстой мягкой подошве.

#### **6.2.4 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных производственных факторов.**

Основную опасность при нахождении и производстве работ электротехническим персоналом на электрооборудовании котельной представляют опасность поражения электрическим током и попадание человека во вращающиеся части производственного оборудования. Для обеспечения безопасности привод вентилятора котла спроектирован и смонтирован согласно правил ПУЭ. Так, для защиты персонала преобразователь частоты установлен в запираемый электрический шкаф, и оснащён соответствующим аппаратом защиты, питающий кабель до электродвигателя проложен в металлическом коробе. Электродвигатель заземлен, обеспечено уравнивание потенциалов. Согласно ПТЭЭП проведено испытаний устройств заземления, питающего кабеля, электродвигателя. Все вращающиеся части электродвигателя ограждены. На шкаф ПЧ и на ограждения двигателя нанесены знаки, предупреждающие об опасности.

Категория помещения котельной по степени опасности поражения электрическим током-особо опасное помещение (согласно ПУЭ глава 1.1.13) из за наличия двух или более условий повышенной опасности, в частности наличие токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.

Для безопасного проведения работ в особо опасных помещениях переносной инструмент подключается к сети 42В.

### 6.3 Экологическая безопасность

Проблема защиты окружающей среды – одна из важнейших задач современности. Защита окружающей среды – это комплексная проблема, требующая усилий всего человечества.

В процессе горения топлива наряду с выделением тепловой энергии с отходящими газами выбрасывается ряд веществ, оказывающих отрицательное воздействие на биосферу. Поэтому важнейшей характеристикой эффективности процесса сжигания топлива является коэффициент избытка воздуха.

Для эффективного и качественного сжигания топлива в котельных агрегатах должно быть точно сбалансировано соотношение "топливо - воздух" по режимной карте. Недостаток воздуха при горении вызывает неполное сгорание и, как следствие, перерасход топлива. Избыток воздуха также приводит к перерасходу топлива на нагрев лишнего воздуха в составе отходящих газов.

В обоих случаях сжигание топлива сопровождается повышенным выбросом в атмосферу высокотоксичных газов (таблица 6.4).

Таблица 6.4 - Воздействие вредных выбросов котельной на биосферу

Вещество	Характеристики
Оксид азота ( $\text{NO}_x$ )	Оказывает вредное воздействие на здоровье человека и способствует образованию парникового эффекта и разрушению озонового слоя, вызывает вымирание лесов, кислотные дожди
Моноксид углерода ( $\text{CO}$ )	Выделяется в результате неполного сгорания топлива. Взаимодействует с другими веществами и оказывает разнообразное вредное воздействие (угарный газ)

Углекислый газ (CO <sub>2</sub> )	Способствует созданию парникового эффекта Экологические законы ограничивают уровень выбросов CO <sub>2</sub> .
--------------------------------------	---

На рисунке 6.1 приведена зависимость содержания основных компонентов продуктов сгорания (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>) и КПД ( $\eta$ ) котла от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ).

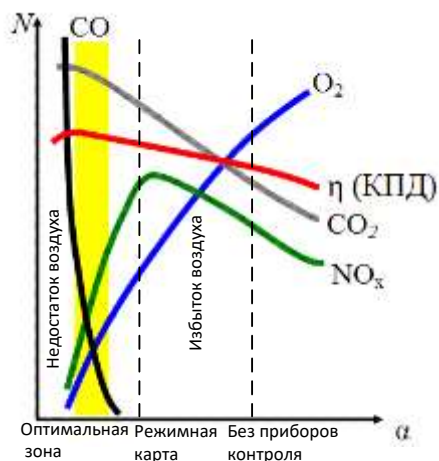


Рис. 6.1 – Зависимость основных компонентов продуктов сгорания от коэффициента избытка воздуха  $N(\alpha)$

Получить комплексное решение по автоматизации и оптимизации процесса горения позволяет применение регулируемого электропривода с преобразователем частоты. Разряжение в топке котла держится одинаковым при всех режимах работы (диапазон изменения мощности горелки от 15% до 100%, в зависимости от температуры наружного воздуха), а настройка соотношения «газ-воздух» при изменении мощности горелки не меняется, поэтому содержание вредных газов в дымовой трубе минимальное.

Что касается электроприводов, то они рассчитаны на длительный срок службы, по истечении которого должны быть утилизированы.

Утилизируемые электроприводы демонтируются, разбираются и сортируются по различным материалам: отходы электронных деталей, черные и цветные металлы, смазочные материалы. Отсортированные материалы устраняются через упорядоченную систему утилизации, с соблюдением местных правил;

-при утилизации должны быть выдержаны нормы охраны окружающей среды;

#### **6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

При эксплуатации котлов возможны следующие аварийные ситуации:

- пожар
- взрыв котла

Взрыв котла возможен при неправильной эксплуатации котла.

Пожар обусловлен наличием горючих веществ, короткими замыканиями электрооборудования, не соблюдением правил пожарной безопасности

Действия в аварийных ситуациях.

Наиболее вероятным ЧС является пожар.

Причиной возгорания может быть:

- короткое замыкание в блоке питания или высоковольтном блоке;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие кислорода, как окислителя процессов горения;
- наличие утечек с подводящих трубопроводов.

Для предупреждения возгораний необходимо выполнять мероприятия по пожарной профилактике, которые разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводки и оборудования, отопления, вентиляции, освещения.

Необходимо предусмотреть ряд мер, направленных на обеспечение тушения пожара:

- наличие пожарных щитов и ящиков с песком в коридорах, асбестовое полотно;

- наличие гидрантов с пожарными рукавами;
- телефонная связь с пожарной охраной;
- огнетушители: химический пенный ОХП-10 и углекислотный ОУ-5.

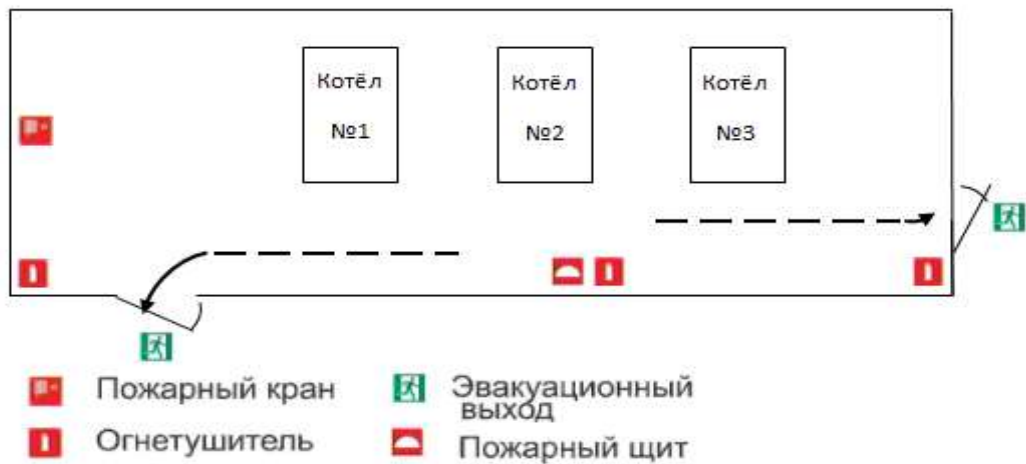


Рисунок 6.2 – План эвакуации персонала при пожаре

### Выводы по разделу

В разделе социальная ответственность проекта были рассмотрены вопросы требований к персоналу, трудового распорядка и оплаты труда на производстве. Так же были выявленные вредные и опасные производственные факторы, а также описаны мероприятия по снижению воздействия вредных и опасных производственных факторов на персонал, учитывая специфику производства. Были рассмотрены возможные ЧС, а также описаны действия при наступлении наиболее вероятной ЧС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной выпускной квалификационной работы является модернизация электропривода дутьевого вентилятора котельной

Предложено заменить существующий морально устаревший и выработавший ресурс нерегулируемый электропривод на частотно-регулируемый асинхронный электропривод. По результатам расчета требуемой мощности двигателя выбран электродвигатель серии *5A200L6*, а также преобразователь частоты *ИРБИ 823-30*, НПФ «ИРБИС», г.Новосибирск.

Результаты аналитических расчетов и имитационного моделирования подтверждают правильность выбора силовых элементов – электродвигателя и преобразователя – и реализации системы автоматического частотно-регулируемого электропривода дутьевого вентилятора котла.

Система преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель обеспечивает требуемые статические и динамические нагрузки привода дутьевого вентилятора, а система автоматического регулирования с векторным управлением обеспечивает поддержание технологических параметров в режимах пуска и воздействия возмущений с принятыми параметрами. Окончательное решение по выбору типа и настройки технологического регулятора может быть принято по результатам производственных испытаний.

В экономической части выпускной квалификационной работе рассмотрены вопросы планирования, финансирования и проведения пуско-наладочных работ электропривода дутьевого вентилятора. Составлена смета на проведение ПНР и построен график выполнения пуско-наладочных работ и занятости исполнителей, а так же доказана экономическая целесообразность от внедрения спроектированного электропривода. В разделе безопасности и экологичности проекта освещены вопросы: промышленной безопасности; техники безопасности; анализ опасных и вредных производственных

факторов; пожарная безопасность; рассмотрены мероприятия по охране окружающей среды.



## Список литературы.

1. Стрельченко В.В. Геофизические исследования скважин. Учебник для вузов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2008. – 551 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода. Учебник для вузов. –М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
3. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод. Учебное пособие. –Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 224 с.
4. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем Часть 2. Оптимизация контура регулирования. –Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 156 с.
5. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 6 Механическая система электропривода. –Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 148 с.
6. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 7 Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов.–Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 164 с.
7. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод.–Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.
8. Королева Н.И., Трофимова М.Н. Техничко-экономические показатели при проектировании электроприводов. Методическое пособие.–Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2001. – 67 с.
9. Бибилуров В.П. и др. Правила безопасности при геологоразведочных работах. – М.: Недра, 1979. – 249 с.
10. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
11. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
12. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.
13. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.
14. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – СПб.: ДЕАН, 1999. – 320 с.
15. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. с изм. и дополн. – СПб, 2002. – 123 с.

- 16 Безопасность жизнедеятельности. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 2002. – 357с.
17. Раицкий К.А. Экономика предприятия: учебник для вузов. – М.: Дашков и К, 2002. – 1012 с.
18. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
19. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – СПб.: ДЕАН, 1999. – 320 с.
20. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. с изм. и дополн. – СПб, 2002. – 123 с.
21. Безопасность жизнедеятельности. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 2002. – 357с.
22. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. 2014г.
23. Основы противопожарной защиты предприятий ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76.
24. Охрана окружающей среды. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 1991.
25. ГОСТ 12.2.003-91 – 92. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
26. ГОСТ 12.1.009-76 – 77 ССБТ. Работы погрузочно-разгрузочные. Общие требования. 8] ГОСТ 12.4.026-76 – 78. Света сигнальные и знаки безопасности. Общие требования безопасности.
27. ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
28. СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
29. ГОСТ 12.2.062-81 Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Ограждения защитные
30. ГОСТ 12.1.019 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
31. ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
32. ГОСТ 12.4.125-83 Система стандартов безопасности труда. Средства коллективной защиты работающих от воздействий механических факторов. Классификация.
33. СНиП 3.05.06-85 – 88. Электротехнические устройства.
34. ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

35. 17] СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. М.: Минздрав России, 1997.

36. 18] ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

ПРИЛОЖЕНИЕ А

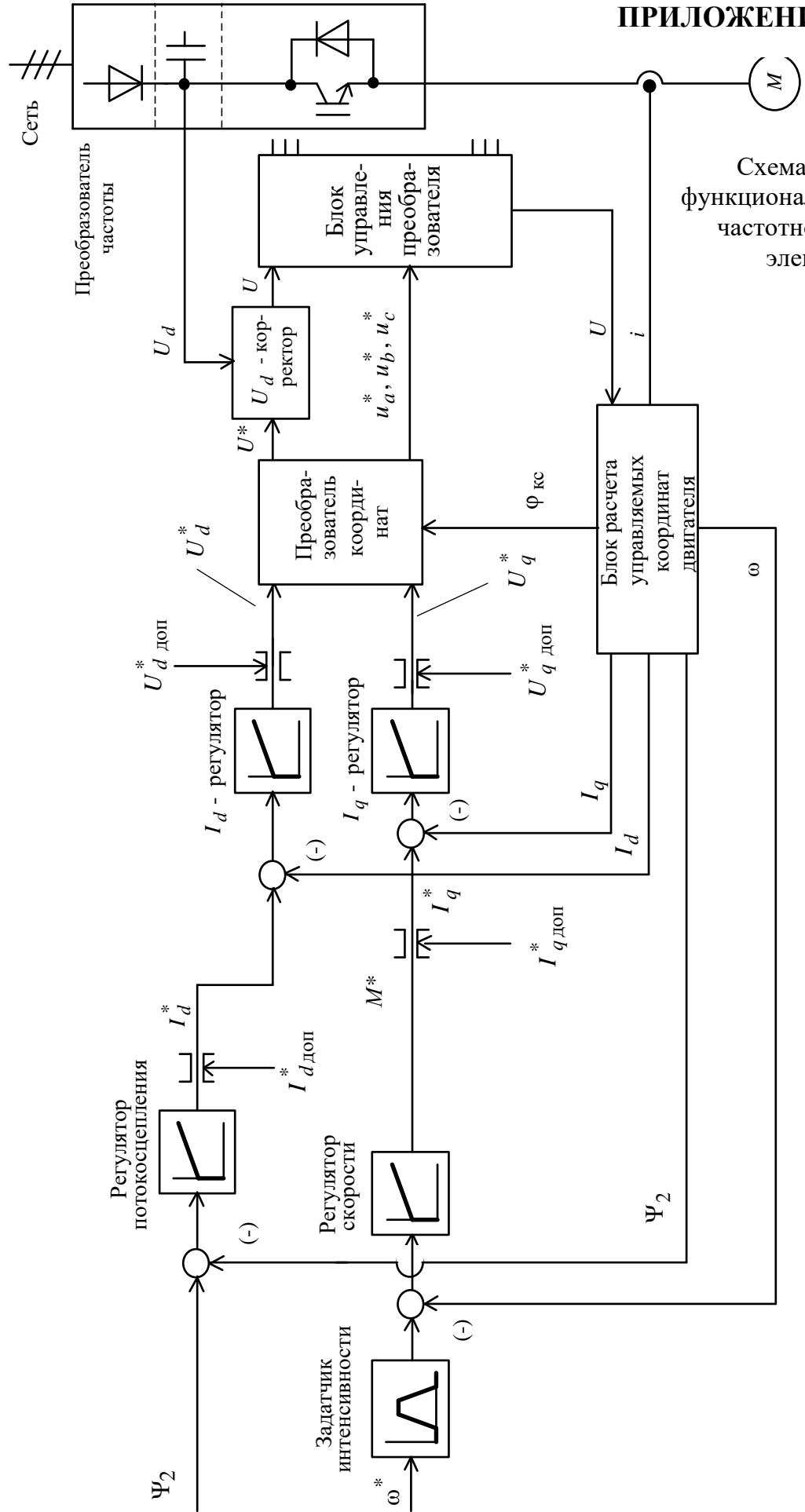
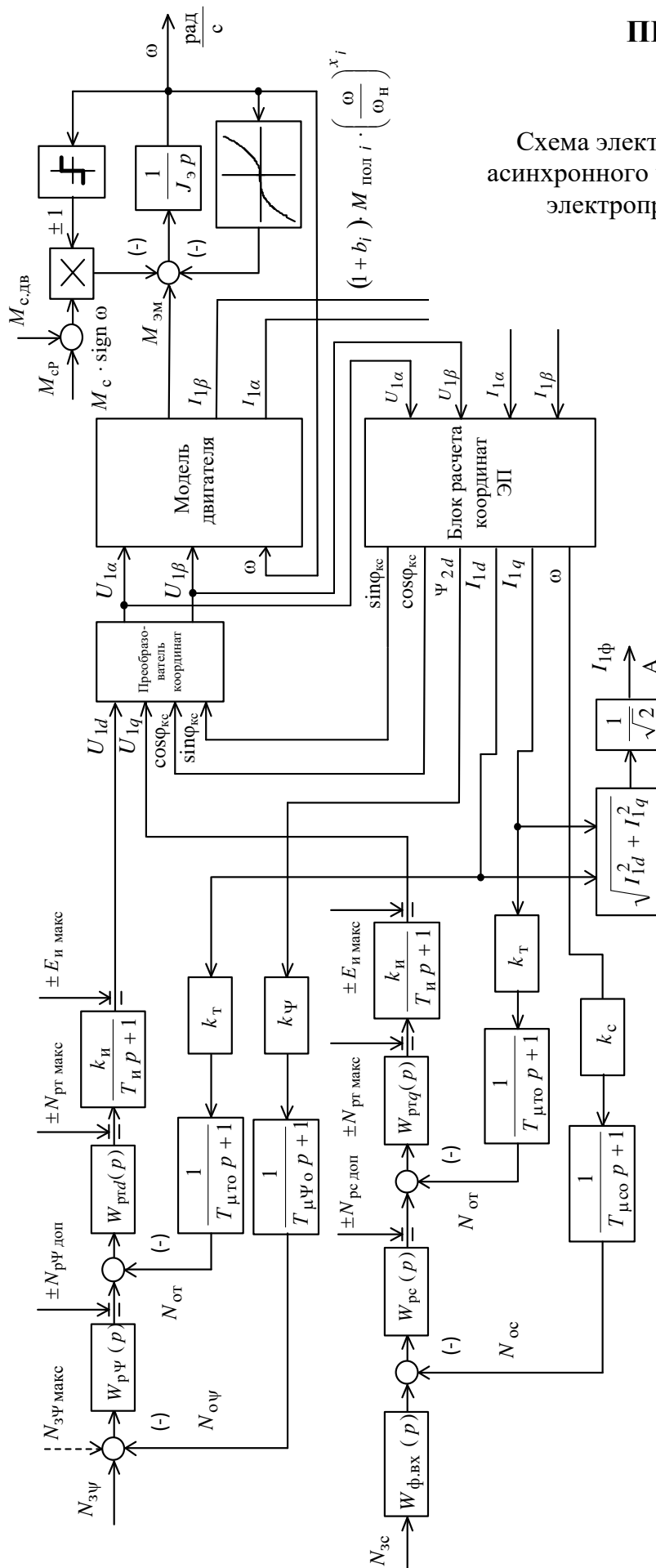


Схема электрическая функциональная асинхронного частотно-регулируемого электропривода

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Схема электрическая структурная  
асинхронного частотно-регулируемого  
электропривода вентилятора



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Схема набора имитационной модели САР давления

